รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

A Study on Copper Clad Wrinkles in Copper Clad Lamination Process

นางสาวณัฐธิดา เที่ยงตรง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

A Study on Copper Clad Wrinkles in Copper Clad Lamination Process

นางสาวณัฐธิดา เที่ยงตรง

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

ชื่อโครงงานสหกิจศึกษา การศึกษาการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

ชื่อ-สกุล นักศึกษา นางสาวณัฐธิดา เที่ยงตรง

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ **ภาควิชา** วิศวกรรมเคมี

ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ

ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน คุณศราวุฒิ เพ็ชรไทย และคุณจักรวรรดิ์ คำก้อน

สถานประกอบการ บริษัท ไทยลามิเนตแมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด

บทคัดย่อ

บริษัท ไทยลามิเนต แมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด เป็นผู้ผลิตแผ่นพรีเพรก (Prepreg) และแผ่นลามิเนต (Copper clad laminate) สำหรับใช้ผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board: PCB) การผลิตแผ่นพรีเพรกทำโดยนำไฟเบอร์กลาสชุบน้ำยาวานิชและอบด้วยความร้อน จากนั้นนำแผ่นทองแดงมาประกบทั้งสองด้านของแผ่นพรีเพรก แล้วทำการลามิเนชันด้วยความดันและอบด้วยความร้อนจะได้แผ่นลามิเนต ปัญหาที่พบคือเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงบนแผ่นลามิเนต จึงไม่สามารถนำไปผลิตแผ่น PCB เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจร ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการศึกษาหาสาเหตุการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงบนแผ่นลามิเนตเพื่อหาแนวทางแก้ไข จากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังแสดงสาเหตุและผล ตัวแปรที่คาดว่ามีผลต่อการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ได้แก่ รูปแบบของการปรับความดันในการทำลามิเนชัน ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิ 180 °C และขอบของไฟเบอร์กลาส จึงทดลองผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.14 - 2.06 มม. โดยใช้แผ่นทองแดงความหนา 0.018 มม. และปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 1 พบว่าแผ่นลามิเนตที่ทดลองผลิตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 2.35% ของจำนวนที่ทดลองผลิต ซึ่งการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงนี้มีค่าเท่ากับก่อนการทดลองที่ใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ จึงทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 และ 072 ตามลำดับ และปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 พบว่ารอยยับของแผ่นทองแดงที่เกิดลดลง 0.79% และ 2.08% จากที่ใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ จากนั้นทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดและต่ำสุดในล็อต และใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ พบว่าแผ่นลามิเนตที่ใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง และสูตรน้ำยาวานิช 162 และ 264 เกิดรอยยับต่ำกว่าแผ่นลามิเนตที่ใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำ แผ่นลามิเนตที่ใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงและปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 มีการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงลดลงในทุกสูตรน้ำยาวา

นิช 063, 264 และ 072 เมื่อเทียบกับการใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ และมีค่าเฉลี่ยของแต่ละสูตรลดลงเท่ากับ 0.45%, 0.42% และ 0.20% ตามลำดับ ส่วนแผ่นลามิเนตที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าแผ่นลามิเนตที่ใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC สูตรน้ำยาวานิช 264 ที่ใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเพิ่มขึ้น 1.79% และลดลง 0.03% ตามลำดับ จากงานนี้สรุปได้ว่าการปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 เหมาะสำหรับกับการผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 063, 264 และ 072 และแผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18 - 24 และ 8 - 11 ตามลำดับ

คำสำคัญ : รอยยับของแผ่นทองแดง แผ่นลามิเนต ลามิเนชัน

Cooperative Title: A Study on Copper Clad Wrinkles in Copper Clad Lamination Process

Student intern name: Miss. Nutthida Tiangtrong

Faculty: Engineering **Department:** Chemical Engineering

Advisor name: Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

Mentor name: Mr. Sarawut Petthai

Mr. Jakkawat Kamkon

Company: Thai Laminate Manufacturer Co., Ltd.

ABSTRACT

Thai Laminate Manufacturer Co., Ltd. manufacturers and sells prepreg and copper clad laminate, which are two components vital to the production of printed circuit boards, or PCBs. Fiberglass is coated by varnish and move through treater tower. It is heated into a semi cured stage prepreg. Prepregs are articulated side by side with copper foils and transfer to hot press. A number of copper clad laminates are copper clad wrinkles. Which can not be used for PCB. Then the objectives of this project are to find causes and set up recommendations to reduce the copper clad wrinkles. Based on an analysis of the cause and effect diagram, the parameters that are expected to effect the copper clad wrinkles are the pattern of pressure in lamination, the percentage of elongation of copper foil at 180°C and the edge of fiberglass. In laminate production test is manufactured on laminate thickness 1.14 - 2.06 mm. by using copper foil thickness 0.018 mm. The first test is set the pressure pattern 1 for lamination and manufacture laminate. The first test result shows that the laminate production by using varnish 262 and copper foil from vendor NY are copper clad wrinkles 2.35% of tester. The copper clad wrinkles are equal to the original pattern of pressure for lamination from company. The second test is set the pressure pattern 2 for lamination and manufacture laminate. The second test results show that the laminate production by using varnish 264 and 072 and copper foil from vendor LT and CC respectively are copper clad wrinkles decreasing to 0.79% and 2.08% from original pattern of pressure in lamination from company. The third test is manufacture laminate by using varnish 162 and 264, copper foil from vendor CC and the original pattern of pressure for lamination from company. The third test results show that the laminate production by using high percentage of elongation of copper foil is copper clad wrinkles more than using low percentage of elongation of copper foil. The fourth test is manufacture laminate by using copper foil from vendor LT and CC at high percentage of

elongation and the pressure pattern 2 for lamination. The fourth test results show that copper clad wrinkles are reduced in all varnish 063, 264 and 072 when compared with the original pattern of pressure in lamination from company. The average of copper clad wrinkles in each varnish formula are decreasing to 0.45%, 0.42% and 0.20% respectively but for varnish 262, the copper clad wrinkles are increase. In addition, the laminate production by using prepreg from fiberglass without edge, varnish 264, the original pattern of pressure in lamination from company and copper foil from vendor LT and CC are copper clad wrinkles increasing to 1.79% and decreasing to 0.03% respectively. In conclusion, the pressure pattern 2 for lamination is compatible with varnish 063, 264, 072 and copper foil from vendor CC in 8 – 11 percentage of elongation and vendor LT in 18 – 24 percentage of elongation.

Keywords : Copper clad laminate, Copper clad wrinkle, Lamination

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารบริษัท ไทยลามิเนตแมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าทำโครงการสหกิจศึกษาในแผนกวิศกรรมกระบวนการผลิต คุณดาวิณทร์ มานะจิต ผู้จัดการแผนก ที่ให้การสนับสนุน คุณศราวุฒิ เพ็ชรไทย คุณจักรวรรดิ์ คำก้อน และคุณณัช ทิมขำ วิศวกรกระบวนการผลิตที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต คุณอดิศักดิ์ ไวยสัจจา วิศวกรอาวุโส คุณพัณนิดา พุ่มพวง หัวหน้าฝ่ายการผลิตแผ่นลามิเนตและพี่ ๆ ในฝ่ายการผลิตทุกท่านที่ดูแล ให้คำแนะนำและสอนความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนตและแผ่นพรีเพรก ทำให้ข้าพเจ้าได้รับความรู้และประสบการณ์ที่ดีมาตลอดระยะเวลาการดำเนินงานสหกิจศึกษา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์นิเทศที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการแก้ไขปัญหาระหว่างการทำสหกิจศึกษา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานสหกิจศึกษาเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและหากมีสิ่งใดผิดพลาด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ณัฐธิดา เที่ยงตรง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ III

กิตติกรรมประกาศ V

สารบัญ VI

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูปภาพ IX

คำศัพท์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย XI

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตของโครงการ 2

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต 3

2.2 แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ 8

2.3 แผนภาพพาเรโต 9

2.4 แผนผังแสดงสาเหตุและผล 11

2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 13

2.6 ไฟเบอร์กลาส 15

2.7 น้ำยาวานิช 16

2.8 แผ่นทองแดง 17

2.9 เอกสารที่เกี่ยวข้อง 18

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 19

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต 20

3.2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 20

3.3 ค้นหาสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 20

3.4 ทดลองหาอุณหภูมิของเรซิ่นบนไฟเบอร์กลาสที่เริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้างกัน 20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชัน 20
3.6 เลือกแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนต 21
3.7 ตัดขอบไฟเบอร์กลาส 21
3.8 ทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตและวิเคราะห์ผล 21
บทที่ 4 ผลการวิจัย 23
4.1 ผลการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นทองแดงยับ 23
4.2 แผนผังแสดงสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 29
4.3 ผลการทดลองหาอุณหภูมิของเรซิ่นบนไฟเบอร์กลาสที่เริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้างกัน 35
4.4 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชัน 35
4.5 เลือกเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดง 38
4.6 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้การปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 และเลือกใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่อุณหภูมิ 180°C 40
4.7 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ 45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 46
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน 46
5.2 ข้อเสนอแนะ 46
บรรณานุกรรม 47
ภาคผนวก 48
ประวัติผู้เขียน 51

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 อุณหภูมิของเรซิ่นที่เริ่มอ่อนตัวในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช 28
4.2 อุณหภูมิเริ่มต้นที่เรซิ่นเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช 35
4.3 ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตเมื่อใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY 36
4.4 ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยรูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2 37
4.5 ผลการผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. เมื่อทำการเลือกค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดง 39
4.6 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. และใช้สูตรน้ำยาวานิช 063 41
4.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 264 42
4.8 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 072 แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC 43
4.9 ผลการทดลองครั้งที่ 4 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 262 44
4.10 ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 โดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ 45

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

2.1 กระบวนการผลิตแผ่นพรีเพรก 3

2.2 กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต 5

2.3 แผ่นพรีเพรก 6

2.4 แผ่นลามิเนต 6

2.5 ขั้นตอนการทำลามิเนชัน 6

2.6 แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลายวงจรขาด 8

2.7 แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลายวงจรไม่เต็มเส้น 8

2.8 หลักการของพาเรโต 9

2.9 การสร้างเส้นความถี่ 10

2.10 การอ่านพาเรโต 10

2.11 ส่วนประกอบในการสร้างแผนผังแสดงสาเหตุและผล 12

2.12 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วย DSC 14

2.13 เครื่อง DSC 14

2.14 เครื่อง Melt flow rate 14

2.15 ไฟเบอร์กลาส 15

2.16 แผ่นทองแดง 17

3.1 แผนผังขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย 19

4.1 แผนภาพพาเรโตชนิดของเสียที่เกิดจากการผลิตแผ่นลามิเนต ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 23

4.2 แผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 24

4.3 ภาพตัดขวางแผ่นลามิเนต ณ ตำแหน่งที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า 25

4.4 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละความหนาของแผ่นทองแดงที่ใช้ผลิตแผ่นลามิเนต (เก็บข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560) 25

4.5 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิตแผ่นทองแดง เมื่อใช้แผ่นทองแดงความหนา 18 μm ทั้งสองด้าน (เก็บรวบรวมข้อมูลตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560) 26

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4.6 แผนภาพพาเรโตความหนาของแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 27
4.7 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้ไฟเบอร์กลาสแต่ละชนิด ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 28
4.8 แผนผังแสดงสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 29
4.9 แผ่นลามิเนตเมื่อยางดูดสุญญากาศมีปัญหา 30
4.10 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนตเมื่อใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY 36
4.11 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช เมื่อผลิตแผ่นลามิเนตด้วยรูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 38
4.12 แผนภูมิกล่องเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิต 38
4.13 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในผลิตแผ่นลามิเนตโดยเลือกค่าการยืดตัว 40
4.14 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 1 41
4.15 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 2 42
4.16 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 3 43
4.17 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 4 44
4.18 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิต เมื่อทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ 45

คำศัพท์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

น้ำยาวานิช (Varnish)	= อีพ็อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin) นำมาผสมกับตัวทำละลายและสารเคมีตามสัดส่วนที่กำหนด
แผ่นพรีเพรก (Prepreg)	= ไฟเบอร์กลาสชุบน้ำยาวานิชและอบด้วยความร้อน
แผ่นลามิเนต (Copper clad laminate)	= แผ่นพรีเพรกที่ถูกประกบทั้งสองด้านด้วยแผ่นทองแดง
เรซิ่น	= น้ำยาวานิชที่แข็งตัวเกาะอยู่บนไฟเบอร์กลาส
ตู้เพรส (Hot press)	= ตู้ที่ผลิตแผ่นลามิเนต
เพรสงาน	= การทำลามิเนชัน
ลามิเนชัน (Lamination)	= ขั้นตอนการผลิตแผ่นลามิเนต โดยการอัดด้วยแรงดันและอบด้วยความร้อน ภายในตู้เพรส
Gel time	= เวลาในการแข็งตัวของเรซิ่นเมื่อถูกให้ความร้อน
Caul plate	= แผ่นแสตนเลสสำหรับนำความร้อนในการทำลามิเนชัน
Cushion pad	= แผ่นรองกันกระแทกทำด้วยยาง และมีหน้าที่กันความร้อนไม่ให้ถ่ายโอนสู่ชิ้นงานโดยตรงขณะทำลามิเนชัน
Scrubber	= เครื่องขัดและล้างแผ่น Caul Plate
Lay up	= การจัดเรียงแผ่นทองแดง แผ่นพรีเพรก และแผ่น Caul plate เพื่อทำการลามิเนชัน

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

บริษัท ไทยลามิเนต แมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด ดำเนินธุรกิจเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายแผ่นพรีเพรก (Pre impregnated fiberglass หรือ prepreg) และแผ่นลามิเนต (Copper clad laminate) ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board หรือ PCB) ดังนั้นกลุ่มลูกค้ากว่าร้อยละ 90 จึงเป็นบริษัทผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ และบริษัทผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าบางส่วน

ขั้นตอนการผลิตพรีเพรกเริ่มจาก อีพ็อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin) ถูกนำมาผสมกับตัวทำละลายและสารเคมีตามสัดส่วนที่กำหนด เรียกว่า น้ำยาวานิช (Varnish) จากนั้นม้วนไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) จะเคลื่อนที่ผ่านอ่างที่บรรจุน้ำยาวานิช แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทรีเตอร์ (Treater) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม น้ำยาวานิชจะจับตัวกันเกาะอยู่บนไฟเบอร์กลาส และค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงเมื่อออกจากทรีเตอร์ พรีเพรกที่ได้บางส่วนนี้จะจำหน่ายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป และบางส่วนจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นลามิเนตต่อไป

ขั้นตอนในการผลิตแผ่นลามิเนต คือตัดแผ่นทองแดง (Copper foil) และแผ่นพรีเพรกตามขนาดที่ต้องการ นำมาเรียงสลับกันเป็นชั้นคั่นด้วยแผ่นแสตนเลส (Caul plate) จากนั้นนำเข้าตู้เพรส (Hot press) แล้วทำการลามิเนชันด้วยความดันและการอบด้วยความร้อน ใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง จะได้แผ่นลามิเนตพร้อมนำมาตัดตามขนาดที่กำหนดตามความต้องการของลูกค้า

แผ่นลามิเนตที่ผลิตได้พบว่า เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (Copper clad wrinkles) ซึ่งหากนำแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมากัดลายวงจรเพื่อผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะทำให้เกิดการลัดวงจร จึงไม่สามารถจำหน่ายสินค้าให้แก่ลูกค้าได้ และการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเป็นของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดเป็นลำดับที่ 3 จากของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต ดังนั้นจึงสนใจศึกษาสาเหตุการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนต เพื่อหาแนวทางการแก้ไข และลดความเสียหายของสินค้า

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสาเหตุการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในกระบวนผลิตแผ่นลามิเนต และหาแนวทางการแก้ไข

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

1.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของแผ่นทองแดงและพฤติกรรมเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส

1.3.3 ทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตเพื่อจำหน่าย

1.3.4 ทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.14 - 2.06 มม.

1.3.5 ทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยแผ่นทองแดงที่ความหนา 0.018 มม.

1.3.6 ปรับโปรแกรมในการทำลามิเนชัน และวิเคราะห์ผล

1.3.7 เลือกค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดง (Percentage of elongation) ในการผลิตแผ่นลามิเนต และวิเคราะห์ผล

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

มีความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต และปรับปรุงขั้นตอนการทำลามิเนชันเพื่อเป็นแนวทางในการลดการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

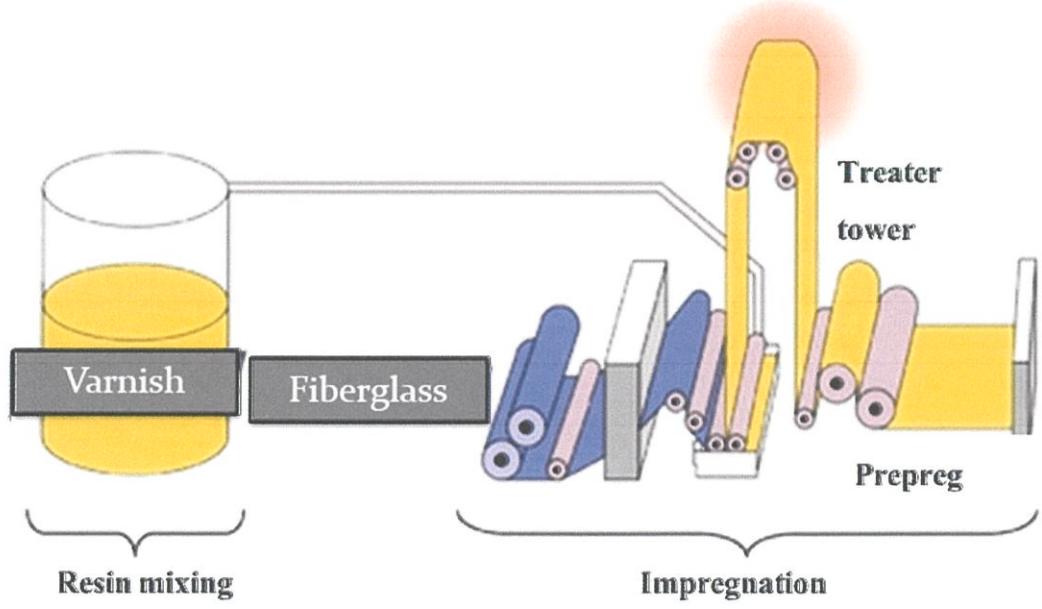
บริษัท ไทยลามิเนตแมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด ดำเนินธุรกิจเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายแผ่นพรีเพรก (Pre impregnated fiberglass หรือ prepreg) และแผ่นลามิเนต (Copper clad laminate) ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed Circuit Board หรือ PCB) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยานยนต์

2.1 กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต [บริษัท ไทยลามิเนตแมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด]

กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต แบ่งได้เป็นสองกระบวนการหลักคือ กระบวนการผลิตแผ่นพรีเพรก และกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

2.1.1 กระบวนการผลิตแผ่นพรีเพรก แสดงดังรูปที่ 2.1

พรีเพรก เป็นคำในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุผสมที่ใช้เรียกตัวเสริมแรงประเภทเส้นใยต่อเนื่องที่ถูกห่อหุ้มแทรกซึมด้วยเรซิ่นพอลิเมอร์ไว้ก่อน โดยที่พอลิเมอร์ได้ผ่านการบ่มเพียงบางส่วน (Semi cured stage) หลังจากนั้นจะถูกนำไปบ่มต่อจนได้ผลิตภัณฑ์โดยไม่ต้องใส่เรซิ่นเพิ่มแต่อย่างใด รูปแบบวัสดุผสมนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากที่สุดในงานด้านโครงสร้าง และงานด้านอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแผ่นพรีเพรก

ที่มา: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1533349/000104746913003526/a2211598zs-1a.ht

จากรูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตพรีเพรกเริ่มจาก อีพ็อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin) ถูกนำมาผสมกับตัวทำละลาย และส่วนผสมต่าง ๆ ตามสัดส่วนที่ทางบริษัทกำหนด เรียกว่า น้ำยาวานิช (Varnish) หรือน้ำยาเรซิ่น จากนั้นม้วนไฟเบอร์กลาส (Fiber glass) จะเคลื่อนที่ผ่านอ่างที่บรรจุน้ำยาวานิช แล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทรีเตอร์ (Treater) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความเร็วที่เหมาะสม ไฟเบอร์กลาสจะถูกเคลือบด้วยฟิล์มบาง ๆ ของน้ำยาวานิชที่มีความหนืดต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้น้ำยาวานิชสามารถแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ และลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เมื่อออกจากทรีเตอร์ พรีเพรกที่ได้จะถูกเก็บไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 25 °C และควมคุมความชื้น

น้ำยาวานิชคือ อีพ็อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin) ไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์อีพ็อกซี่เรซิ่น (High performance epoxy resin) ถูกนำมาผสมกับตัวทำละลาย และตัวเร่งปฏิกิริยา (Curing agent) ตามสัดส่วนที่กำหนด ทางบริษัทผลิตแผ่นพรีเพรกด้วยสูตรน้ำยาวานิชทั้งหมด 5 สูตร คือ 063, 072, 162, 262 และ 264 ในแต่ละสูตรน้ำยาวานิชมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้คุณสมบัติของแผ่นพรีเพรกที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยาวานิชที่ต่างกันมีคุณสมบัติต่างกันไปด้วย ขึ้นอยู่กับการใช้งานของผลิตภัณฑ์ อาทิ เหมาะสำหรับการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบไร้สารตะกั่ว (Lead free) เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเมื่อนำไปผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์แล้วสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมของการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงและรวดเร็ว เป็นต้น

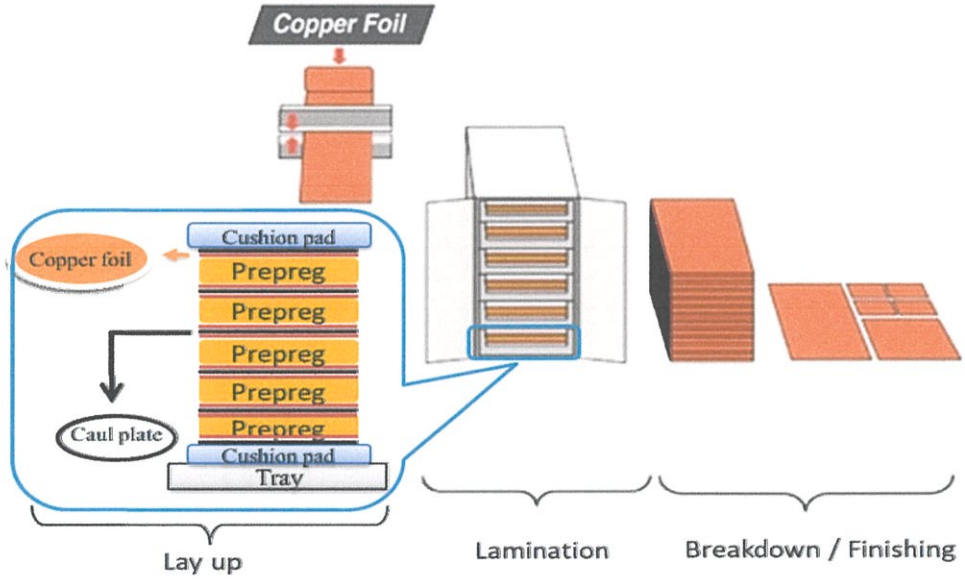
ในการผลิตแผ่นพรีเพรกบางครั้งอาจมีการผ่านอ่างบรรจุน้ำยาวานิชถึง 2 อ่าง อ่างแรกมีวัตถุประสงค์เพื่อให้น้ำยาวานิชซึมเข้าสู่เส้นใยไฟเบอร์กลาส การที่น้ำยาวานิชซึมเข้าสู่เส้นใยไฟเบอร์กลาส ได้ไม่ดีจะทำให้แผ่นพรีเพรกที่ผลิตได้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ซึ่งทางลูกค้าไม่ต้องการสินค้าที่มีฟองอากาศอยู่ภายใน สำหรับอ่างที่สองจะเป็นตัวกำหนดความหนาของแผ่นพรีเพรกผ่านการกำหนดความกว้างของลูกกลิ้ง (Metering rolls) โดยปกติแล้วน้ำยาวานิชในอ่างแรกจะมีความหนืดต่ำกว่าอ่างที่สองและมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน น้ำยาวานิชมีการควบคุมความหนืดโดยมีการวัดค่าความหนืดตลอดเวลาด้วยเครื่องวัดความหนืดอัตโนมัติ เนื่องจากหากความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อการจับตัวกันของเรซิ่นบนไฟเบอร์กลาส และน้ำยาวานิชที่ถูกบรรจุอยู่ในอ่างต้องมีการหมุนเวียนตลอดเวลาเพื่อให้แต่ละองค์ประกอบของน้ำยาวานิชเกิดการผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสม ป้องกันการจับตัวเป็นก้อนและเพื่อให้คุณสมบัติของแผ่นพรีเพรกสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น เพราะคุณสมบัติของแผ่นพรีเพรกจะขึ้นอยู่กับเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส

ก่อนจำหน่ายแผ่นพรีเพรกสู่ลูกค้าต้องมีการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนี้ มีการทดสอบหาปริมาณเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส (Resin content) คือการหาปริมาณของเรซิ่นที่เคลือบอยู่บนไฟเบอร์กลาสโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับน้ำหนักของพรีเพรก ทดสอบหาค่า Gel time

คือการหาเวลาในการแข็งตัวของเรซิ่นเมื่อถูกให้ความร้อน หาปริมาณเรซิ่นที่ไหลออกเมื่อถูกให้ความร้อนและอัดด้วยแรงดัน (Resin flow) และวัดอัตราการไหลของเรซิ่น (Melt flow) โดยใช้เครื่อง Melt flow rate หรือ MFR พรีเพรกมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถทนต่ออุณหภูมิค่อนข้างสูง แข็งแรงและไม่บิดงอได้ง่าย

2.1.2 กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

แผ่นลามิเนต คือ แผ่นพรีเพรกที่ถูกประกบด้วยแผ่นทองแดง (Copper foil) ทั้งด้านบนและด้านล่างรวมเป็นแผ่นเดียวกัน มีกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

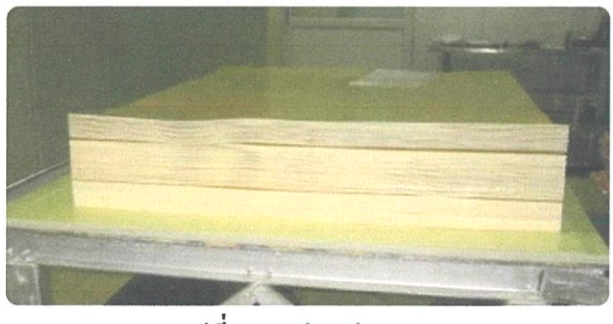
ที่มา: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1533349/000104746913003526/a2211598zs-1a.ht

ขั้นตอนในการผลิตแผ่นลามิเนตแสดงดังรูปที่ 2.2 อันดับแรกคือตัดแผ่นทองแดง และแผ่นพรีเพรกตามขนาดที่กำหนด แล้วนำมาเรียงสลับกันเป็นชั้น เรียกว่า ขั้นตอนการจัดเรียง หรือ Lay up ชั้นแรกเป็น Cushion pad ทำหน้าที่เปรียบเสมือนผ้าห่มความร้อน ป้องกันความร้อนไม่ให้ถ่ายโอนสู่ชิ้นงานโดยตรงและเป็นแผ่นรองกันกระแทกขณะทำลามิเนชัน ชั้นที่สองเป็นแผ่นแสตนเลส (Caul plate) ทำหน้าที่ช่วยกระจายความร้อน ชั้นที่สามเป็นแผ่นทองแดง ชั้นที่สี่เป็นแผ่นพรีเพรก จำนวนในการใช้แผ่นพรีเพรกขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นลามิเนตที่ต้องการผลิต ชั้นที่ห้าเป็นแผ่นทองแดง ชั้นที่หกปิดด้วยแผ่นแสตนเลส หากเสร็จสิ้นการทำลามิเนชันจะได้แผ่นลามิเนตจำนวน 1 แผ่น แต่ในการผลิตจริง

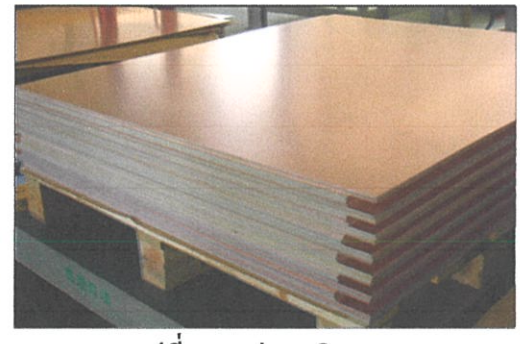
มีการผลิตพร้อมกันหลายแผ่นจึงมีการจัดเรียงดังรูปที่ 2.2 และชั้นสุดท้ายเป็น Cushion pad จากนั้นนำเข้าตู้เพรส (Hot press) วางบนชั้น (Tray) ภายในชั้นจะมีน้ำมันร้อน (Hot oil) เป็นตัวให้ความร้อนในการทำลามิเนชัน และอัดด้วยความดัน ใช้เวลาประมาณ 3 - 4 ชั่วโมง เรียกขั้นตอนนี้ว่า การทำลามิเนชัน (Lamination) จากนั้นนำมาแยกแผ่นแสตนเลสออกจากแผ่นลามิเนต (Breakdown) เมื่อได้แผ่นลามิเนตแล้ว นำไปตัดตามขนาดที่ลูกค้ากำหนด

ในขั้นตอนการตัดแผ่นลามิเนตนี้จะมีการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ด้วยตาเปล่าจากพนักงานด้วย พบว่าแผ่นลามิเนตบางแผ่นเกิดการยุบตัวของแผ่นทองแดงคล้ายรอยขีดตามร่องเส้นใยไฟเบอร์กลาส ซึ่งเรียกว่า "การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (Copper clad wrinkles) " นอกจากตรวจสอบด้วยตาเปล่าแล้วยังมีการตรวจสอบคุณภาพด้านอื่นด้วย อาทิ การตรวจหาปริมาณช่องว่างภายในแผ่นลามิเนต (Void) ค่าการยึดติดของแผ่นทองแดง (Peel strength) และทดสอบความทนทานของแผ่นลามิเนต ต่อสภาพแวดล้อมในการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เป็นต้น

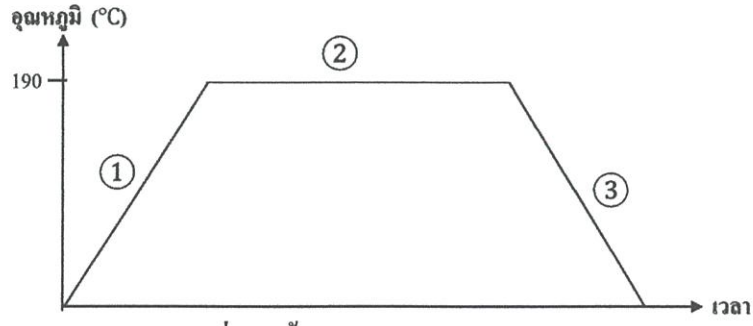
แผ่นลามิเนตที่ได้คุณภาพตามกำหนดจะถูกนำไปบรรจุ และจัดส่งให้ลูกค้าต่อไป ส่วนแผ่นลามิเนตที่ไม่ได้คุณภาพตามกำหนด เช่น เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงหรือเกิดตำหนิชนิดอื่นบนแผ่นลามิเนต หากเกิดในปริมาณเล็กน้อยจะทำการตัดขายในขนาดที่เหมาะสม แต่หากเกิดในปริมาณมากจะส่งให้แก่บริษัทผู้ผลิตแผ่นทองแดงต่อไป



รูปที่ 2.3 แผ่นพรีเพรก



รูปที่ 2.4 แผ่นลามิเนต



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำลามิเนชัน

โปรแกรมในการทำลามิเนชันมีขั้นตอนหลักอยู่สามขั้นตอนที่จะเกิดขึ้นภายในตู้เพรส คือ ขั้นตอนแรก (หมายเลข ① ดังรูปที่ 2.5) เป็นการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้เรซิ่นอ่อนตัว ขั้นตอนที่สอง (หมายเลข ② ดังรูปที่ 2.5) คงอุณหภูมิไว้ที่ค่าหนึ่งให้เรซิ่นเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างตามต้องการ อุณหภูมิและเวลาในขั้นตอนที่สองนี้จะขึ้นอยู่กับสูตรของน้ำยาวานิชที่ใช้ผลิตแผ่นพรีเพรก จากนั้นขั้นตอนสุดท้าย (หมายเลข ③ ดังรูปที่ 2.5) ทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ เพื่อให้เรซิ่นแข็งตัว จะได้แผ่นลามิเนตที่มีความแข็งแรง ไม่บิดงอได้ง่าย

ตู้เพรสขณะทำลามิเนชันมีการอัดด้วยความดันเพื่อให้เรซิ่นทำหน้าที่คล้ายกาวเชื่อมระหว่างแผ่นทองแดงกับไฟเบอร์กลาส อัตราการให้ความร้อนและแรงดันขณะทำลามิเนชันต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม จึงจะทำให้ได้แผ่นลามิเนตที่มีเปอร์เซ็นต์การเชื่อมโยงโครงสร้างและมีความหนาตามต้องการ ซึ่งจะถูกกำหนดตามความต้องการของลูกค้า เวลาในการทำลามิเนชันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแผ่นลามิเนตที่ทำการผลิตหรือตามความเหมาะสม

ในการทำลามิเนชันนอกจากการให้ความร้อนและอัดด้วยความดันแล้วยังมีการให้ความดันที่สุญญากาศ (Vacuum pressure) เพื่อไล่ฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการจัดเรียง (Lay up) และเพื่อให้แผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรกแนบสนิทกันให้มากที่สุด

โปรแกรมในการทำลามิเนชันจะแบ่งตามชนิดของสูตรน้ำยาวานิชที่ใช้ผลิตแผ่นพรีเพรก สายการผลิตแผ่นลามิเนต และความหนาของแผ่นลามิเนตที่ทำการผลิต เนื่องจากน้ำยาวานิชในแต่ละสูตรมีองค์ประกอบทางเคมี และพฤติกรรม หรือรีโอโลยี (Rheology) ที่แตกต่างกัน ในแต่ละสายการผลิตมีตู้เพรสที่มีหลักการทำงานและความสามารถในการผลิตที่แตกต่างกัน ทำให้การตั้งค่าตัวแปรในโปรแกรมการทำลามิเนชันต้องมีการปรับให้เหมาะสมกับแต่ละสายการผลิต รวมถึงความหนาของแผ่นลามิเนตที่แตกต่างกันทำให้การทำลามิเนชันต้องใช้โปรแกรมที่เหมาะสมในแต่ละความหนาด้วย

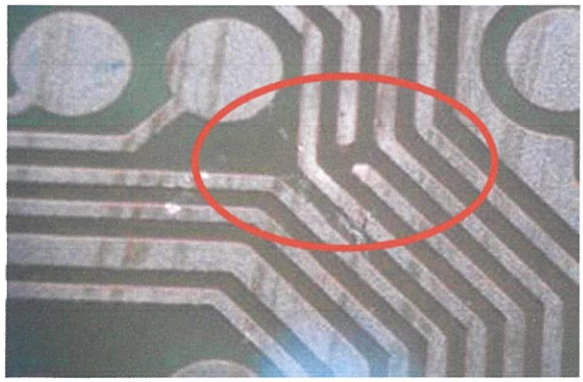
จำนวนแผ่นลามิเนตที่ทำการผลิตในแต่ละครั้ง ขึ้นอยู่กับความสามารถของตู้เพรสและความหนาของแผ่นลามิเนตที่ต้องการผลิต เนื่องจากหากผลิตแผ่นลามิเนตจำนวนมากเกินไปคุณภาพของสินค้าอาจไม่ตรงตามความต้องการของลูกค้า ทำให้เกิดของเสียในการผลิตได้

ในการผลิตแผ่นพรีเพรกและแผ่นลามิเนตต้องมีการควบคุมความสะอาด โดยจะต้องสวมชุดที่ทางบริษัทกำหนดเท่านั้น เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนเข้ามาในกระบวนการผลิต และพนักงานต้องทำความสะอาดในพื้นที่ทำงานทุกวัน โดยเฉพาะขั้นตอนการบรรจุพรีเพรกสำเร็จรูปในกระบวนการผลิตแผ่นพรีเพรก ขั้นตอนการตัดแผ่นพรีเพรกและขั้นตอนการจัดเรียงในกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต ต้องทำในห้องควบคุมอุณหภูมิ และความชื้น เนื่องจากแผ่นพรีเพรกหากอยู่ในอุณหภูมิสูง หรือมีความชื้นเมื่อนำมาผลิตแผ่นลามิเนตจะทำให้แผ่นทองแดงไม่แนบสนิทกับแผ่นพรีเพรก และคุณสมบัติด้านคุณภาพอื่น ๆ ของแผ่นลามิเนตก็จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อลูกค้านำไปผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ก็จะทำให้ได้สินค้าคุณภาพต่ำไปด้วย

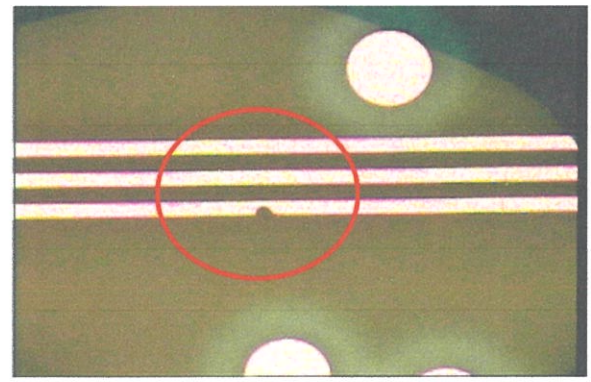
2.2 แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Printed circuit board หรือ PCB) [บริษัท เคซีอี อีเลคโทรนิคส์ จำกัด (มหาชน)]

แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นส่วนประกอบสำคัญในเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งในรถยนต์ โทรศัพท์มือถือ และคอมพิวเตอร์ ที่จะต้องมีแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์อย่างน้อย 1 ชิ้นเป็นองค์ประกอบ ใช้สำหรับต่อวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเพื่อประกอบเป็นวงจร วัตถุดิบหลักในการผลิตคือ แผ่นลามิเนต (Copper clad laminate) และแผ่นพรีเพรก (Pre impregnated fiberglass หรือ prepreg) แผ่นลามิเนตเป็นแผ่นฐาน (Substrate) ทำหน้าที่เป็นฐานที่ใช้กัดลายวงจร ในกรณีที่ต้องการประกอบเป็นวงจรแทนการต่อวงจรด้วยสายไฟ และเป็นฐานที่ยึดตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ในกรณีที่ต้องการใช้เป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และแผ่นพรีเพรก ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และทำหน้าที่คล้ายกาวเชื่อมแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์หลายแผ่นให้เป็นแผ่นเดียวกัน เมื่อต้องการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหลายชั้น (Multilayer)

แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยานยนต์มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีลายวงจรทองแดงเป็นทางเดินสัญญาณไฟฟ้า การผลิตส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีกัดผิวโลหะออก โดยนำแผ่นลามิเนตมากัดเป็นลายวงจร คุณสมบัติที่ต้องพิจารณาของแผ่นลามิเนตได้แก่ ความสมบูรณ์ของแผ่นลามิเนต คือไม่มีรอยตำหนิบนชิ้นงาน อาทิ การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เนื่องจากการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงอาจทำให้แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์มีลายวงจรขาดดังรูปที่ 2.6 หรือลายวงจรไม่เต็มเส้นดังรูปที่ 2.7 และเมื่อนำไปตรวจสอบเส้นลายวงจรด้วยกระแสไฟฟ้า จึงเกิดการลัดวงจรขึ้นได้ สำหรับอุตสาหกรรมยาน-ยนต์ เรื่องนี้เป็นเรื่องที่สำคัญมากเนื่องจากหากนำไปใช้งานแล้วเกิดไฟฟ้าลัดวงจรขึ้นอาจทำให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้บริโภคได้



รูปที่ 2.6 แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลายวงจรขาด

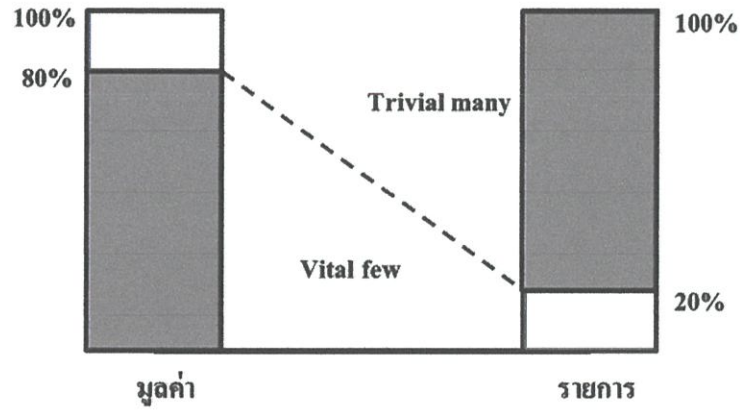


รูปที่ 2.7 แผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ลายวงจรไม่เต็มเส้น

2.3 แผนภาพพาเรโต [กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, 2551]

แผนภาพพาเรโต เป็นแผนภาพที่ใช้จำแนกประเภทของข้อมูล รวมถึงวิเคราะห์ความเสถียรภาพของข้อมูลที่มีการจำแนกประเภทและมีการสะสมตามเวลา โดยแผนภาพดังกล่าวจะใช้แสดงถึงหลักการของพาเรโต ที่ระบุว่า "ภายใต้สภาวการณ์โดยธรรมชาติ สิ่งที่สำคัญมากมีจำนวนน้อย (Vital few) ในขณะที่สิ่งที่มีความสำคัญน้อยจะมีมาก (Trivial many)"

ในการศึกษาถึงกรณีตัวอย่างต่าง ๆ Juran พบว่า สิ่งที่มีความสำคัญจะมีค่าประมาณ 80% ของมูลค่าทั้งหมด จะมาจากรายการเพียงเล็กน้อย ซึ่งมีค่าประมาณ 20% ของจำนวนรายการทั้งหมด จึงอาจเรียกหลักการพาเรโตว่า หลักการ "80-20" ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หลักการของพาเรโต

2.3.1 การสร้างและการประยุกต์ใช้

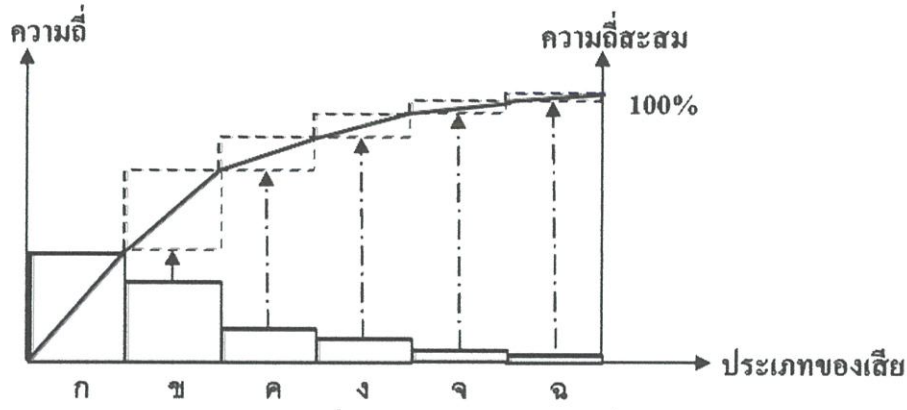
วิธีการสร้างมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างกราฟแท่งเรียงลำดับข้อมูลจากมากไปน้อย
2. นำกราฟแท่งมาเรียงชิดติดกัน
3. เลื่อนกราฟแท่งลำดับที่ 2 ขึ้นมาต่อกับแท่งแรก โดยให้มุมด้านล่างของแท่งที่ 2 ต่อกับมุมด้านบนของแท่งแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.9
4. เลื่อนกราฟแท่งลำดับถัดไปขึ้นมาต่อจนครบทุกแท่ง
5. ลากเส้นทะแยงมุมภายในแต่ละแท่ง โดยลากจากมุมซ้ายล่างไปยังมุมขวาบน

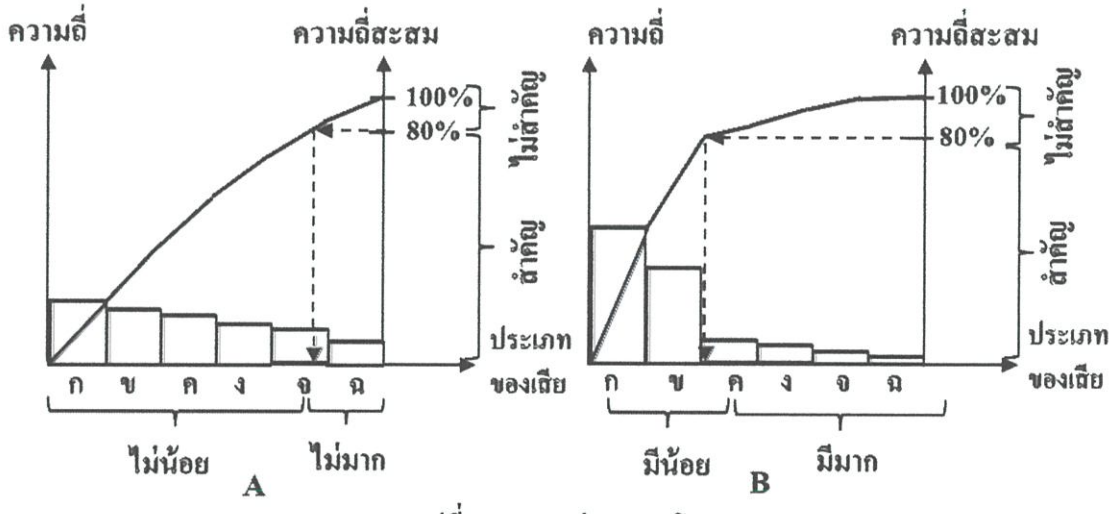
เมื่อสร้างเส้นความถี่สะสมเสร็จแล้ว การอ่านความสัมพันธ์ของข้อมูลมีขั้นตอนดังนี้

1. อ่านค่าจากแกนความถี่สะสมที่ประมาณ 80% จากที่ตำแหน่ง 80% ให้ลากเส้นไปทางซ้ายมือจนชนกับเส้นความถี่สะสมที่สร้างไว้ แล้วลากเส้นตรงตั้งฉากลงมาแบ่งแท่งกราฟดังรูปที่ 2.10

2. พิจารณาจำนวนแท่งกราฟทางด้านซ้ายมือของเส้นตรงที่ลากลงมา เปรียบเทียบกับจำนวนแท่งกราฟทั้งหมด หากจำนวนแท่งกราฟทางด้านซ้ายมือมีจำนวนน้อย แสดงว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปตามหลักการของพาเรโต



รูปที่ 2.9 การสร้างเส้นความถี่



รูปที่ 2.10 การอ่านพาเรโต

จากรูปที่ 2.10 กราฟ A เมื่อทำการลากเส้นจากตำแหน่ง 80% มายังเส้นความถี่สะสม และลากตั้งฉากลงมาแบ่งแท่งกราฟพบว่า ข้อมูลประมาณ 80% มาจากข้อมูลประมาณ 5 แท่ง จากทั้งหมด 6 แท่ง แสดงว่าส่วนที่สำคัญมาก มีไม่น้อย ส่วนที่สำคัญน้อยก็มีเพียงประมาณ 1 แท่ง จาก 6 แท่ง ซึ่งไม่มาก แสดงว่าไม่เป็นไปตามหลักการพาเรโต

ในขณะที่รูปที่ 2.10 กราฟ B เมื่อทำการลากเส้นเหมือนกราฟ A พบว่า ข้อมูลประมาณ 80% มาจากข้อมูล 2 แท่ง จากทั้งหมด 6 แท่ง แสดงว่าส่วนที่สำคัญมาก มีน้อย ส่วนที่สำคัญน้อย มีมาก (4 แท่ง จาก 6 แท่ง) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพาเรโต

หากอ่านกราฟแล้วความสัมพันธ์ไม่เป็นไปตามหลักการพาเรโตแสดงว่ากราฟดังกล่าวไม่ใช่กราฟพาเรโต ไม่ได้แปลว่าหลักการพาเรโตใช้ไม่ได้ แต่ประเด็นอยู่ที่ข้อมูลที่นำมาสร้างพาเรโตยังมีการจำแนกไม่ถูกต้อง หากจำแนกแล้วเป็นไปตามหลักการพาเรโตจะทำให้สามารถเข้าใจ และบริหารจัดการกับประเด็นเหล่านี้ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในการเลือกปัญหาเพื่อทำการแก้ไข จึงควรพิจารณาว่าข้อมูลที่ได้เป็นไปตามหลักการพาเรโตหรือไม่

2.4 แผนผังแสดงสาเหตุและผล [ศิริพร ขอพรกลาง, 2549]

แผนผังสาเหตุและผล (Cause and effect diagram) เป็นสิ่งที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุ (Cause) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible cause) บางครั้งอาจเรียกแผนผังแสดงสาเหตุและผลว่า " แผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) " เนื่องจากแผนผังมีลักษณะคล้ายก้างปลา หรือรู้จักในชื่อของ แผนผังอิชิกะวะ (Ishikawa diagram)

2.4.1 เมื่อไหร่จึงจะใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผล

1. เมื่อต้องการค้นหาสาเหตุของปัญหา
2. เมื่อต้องการทำการศึกษา ทำความเข้าใจ หรือทำความรู้จักกระบวนการอื่น เนื่องจากโดยส่วนใหญ่จะทราบเฉพาะในสิ่งที่ตนเองรับผิดชอบเท่านั้น แต่เมื่อมีการทำแผนผังแสดงสาเหตุและผล จะทำให้ทราบกระบวนการอื่นได้ง่ายขึ้น
3. เมื่อต้องการให้เป็นแนวทางในการระดมสมอง ซึ่งช่วยให้ทุกคนสนใจในปัญหาของกลุ่มซึ่งแสดงไว้ที่หัวปลา

2.4.2 วิธีการสร้างแผนผังแสดงสาเหตุและผล

ขั้นตอนในการสร้างแผนผังแสดงสาเหตุและผลมี 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดประโยคปัญหาที่ส่วนหัว
2. กำหนดกลุ่มปัจจัยที่จะทำให้เกิดปัญหานั้น ๆ
3. หาสาเหตุของปัญหาในแต่ละปัจจัย
4. หาสาเหตุหลักของปัญหา
5. จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ

2.4.3 การกำหนดหัวข้อปัญหา

การกำหนดหัวข้อปัญหาควรกำหนดให้ชัดเจนและมีความเป็นไปได้ที่จะทำการแก้ไขหรือศึกษาต่อ ซึ่งหากกำหนดปัญหาไม่ชัดเจนตั้งแต่แรก จะทำให้ใช้เวลานานในการค้นหาสาเหตุและ

การจัดทำแผนผังแสดงสาเหตุและผล เทคนิคการระดมความคิดเพื่อจะได้ก้างปลาที่ละเอียดคือการถาม ทำไม ทำไม ทำไม ในการเขียนแต่ละก้างย่อย ๆ

การทำแผนผังแสดงสาเหตุและผลสามารถกำหนดกลุ่มปัจจัยอะไรก็ได้ แต่ต้องมั่นใจว่ากลุ่มที่กำหนดไว้เป็นปัจจัยนั้นสามารถช่วยแยกแยะและกำหนดสาเหตุต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ และเป็นเหตุเป็นผล ในส่วนของกระบวนการผลิต โดยส่วนมากมักใช้หลักการ 4M 1E เป็นกลุ่มปัจจัย (Factors) ซึ่ง 4M 1E มาจาก

M – Man คนงาน พนักงาน หรือบุคลากร

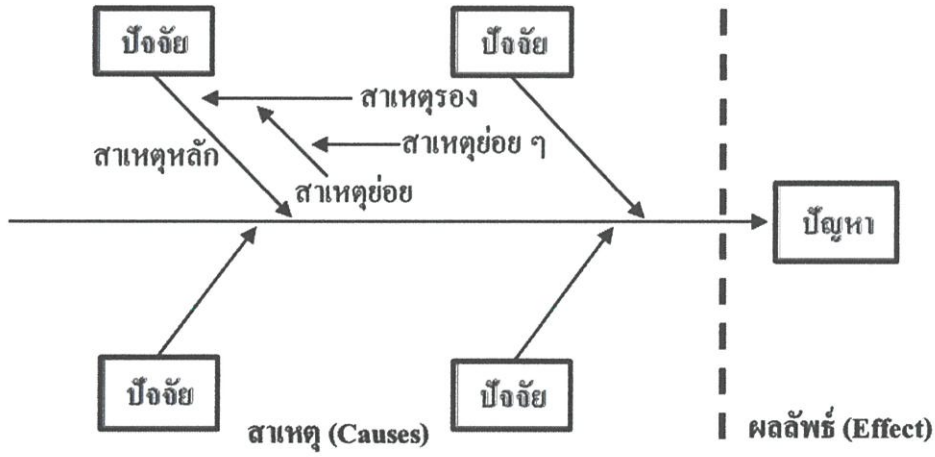
M – Machine เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก

M – Material ผลิตภัณฑ์ บริการ วัตถุดิบหรืออะไหล่ อุปกรณ์อื่นๆ

M – Method กระบวนการทำงาน

E – Environment อากาศ สถานที่ ความสว่าง และบรรยากาศการทำงาน

หากผู้ใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผลมีประสบการณ์ในการแก้ปัญหา หรือพอจะทราบแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอยู่บ้าง ก็สามารถกำหนดกลุ่มปัจจัยให้เหมาะสมกับปัญหาตั้งแต่แรกเริ่มได้ไม่จำเป็นต้องใช้ 4M 1E เสมอไป



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบในการสร้างแผนผังแสดงสาเหตุและผล

2.4.4 ส่วนประกอบของแผนผังแสดงสาเหตุและผล

ส่วนปัญหาหรือผลลัพธ์ (Problem or effect) จะแสดงอยู่ที่หัวปลา ส่วนสาเหตุสามารถแยกได้เป็น ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัญหา สาเหตุหลัก และสาเหตุย่อย ซึ่งสาเหตุเหล่านี้จะถูกเขียนไว้ในก้างปลาแต่ละก้าง โดยก้างย่อยเป็นสาเหตุของก้างรองและก้างรองเป็นสาเหตุของก้างหลัก

หลักการเบื้องต้นของแผนผังแสดงสาเหตุและผล คือการใส่ชื่อของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ไว้ด้านขวาสุด มีเส้นหลักตามแนวยาวของกระดูกสันหลัง จากนั้นใส่ชื่อของปัญหาย่อยโดยลากเป็นเส้นก้างปลา (Sub-bone) ทำมุมเฉียงจากเส้นหลัก เส้นก้างปลาแต่ละเส้นให้ใส่ชื่อของสาเหตุที่คาดว่าจะส่งผลให้เกิดปัญหานั้น ๆ สาเหตุของปัญหาสามารถแบ่งย่อยลงไปอีกได้ถ้ามีองค์ประกอบย่อยโดยทั่วไปแล้วมักมีสาเหตุย่อยลงไปมากที่สุด 4 - 5 ระดับ เมื่อมีข้อมูลที่สมบูรณ์แล้ว จะทำให้มองเห็นองค์ประกอบที่เป็นสาเหตุทั้งหมดของปัญหาได้

2.4.5 ข้อดีของแผนผังแสดงสาเหตุและผล

1. ไม่ต้องเสียเวลาแยกความคิดต่าง ๆ ที่กระจัดกระจาย แผนผังแสดงสาเหตุและผลจะช่วยรวบรวมความคิดที่คล้ายคลึงกันไว้ด้วยกัน

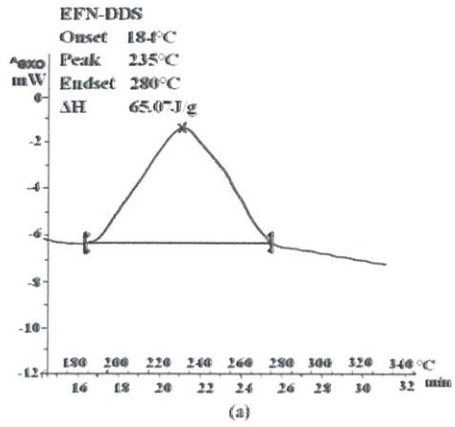
2. ทราบสาเหตุหลักและสาเหตุย่อยของปัญหา ทำให้ทราบสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ซึ่งทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ถูกวิธี

2.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในการศึกษาวิจัยใช้เครื่องมืออยู่สองชนิดได้แก่ เครื่อง Differential scanning calorimeter และเครื่อง Melt flow rate

2.5.1 เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) [Joseph D. Menczel and R. Bruce Prime, 2009]

เทคนิค DSC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารด้วยความร้อนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เครื่อง DSC มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ Differential thermal analysis (DTA) โดยถาดที่บรรจุตัวอย่างและถาดอ้างอิงอยู่บนเทอร์โมคัพเพิล (Thermocouple) ที่ต่อกับเตาเผา หลักการทำงานจะให้ความร้อนแก่ถาดที่บรรจุตัวอย่างและถาดอ้างอิง โดยควบคุมให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของถาดทั้งสองมีค่าเท่ากัน หลังจากให้ความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในถาดที่บรรจุตัวอย่าง ดังนั้นเตาเผาจึงต้องให้ความร้อนแก่ถาดที่บรรจุตัวอย่างมากกว่าถาดอ้างอิง เพื่อควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของถาดทั้งสองให้มีค่าเท่ากัน ปริมาณความร้อนที่ให้กับถาดบรรจุตัวอย่างจะมีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ให้กับตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานความร้อนกับอุณหภูมิ กราฟที่ได้เรียกว่า เทอร์โมแกรม (Thermogram) เรซิ่นเริ่มเชื่อมโยงโครงสร้างเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ข้อมูลที่ได้จากเทอร์โมแกรมของ DSC สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ เรซิ่นเริ่มเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างอยู่ที่เท่าไหร่ โดยลากเส้นตรงตรงฐานของกราฟที่โค้งที่สุด จุดที่ลากเส้นตรงตัดกับกราฟจุดแรกคืออุณหภูมิของเรซิ่นที่เริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้าง (Starting cure temperature) ซึ่ง DSC สามารถบอกพลังงาน ณ จุดนี้ได้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างผลการทดสอบด้วย DSC

รูปที่ 2.13 เครื่อง DSC

ที่มา: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282016000100003

https://bose.res.in/~technicalcell/DSC.html

2.5.2 เครื่อง Melt flow rate [ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และดร.ชาคริต สิริสิงห, 2544]

เมื่อผลิตพรีเพรกแล้วต้องมีการตรวจสอบคุณภาพก่อนส่งสินค้า โดยมีการทดสอบหาปริมาณเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส (Resin content) ค่า Gel time ปริมาณเรซิ่นที่ไหลออกเมื่อถูกให้ความร้อนและอัดด้วยแรงดัน (Resin flow) และวัดอัตราการไหลของเรซิ่น (Melt flow) วิธีการวัดอัตราการไหลของเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส ทำได้โดยการนำแผ่นพรีเพรกมาขยำให้ผงเรซิ่นหลุดออกมา จากนั้นนำเข้าเครื่องอัดแท่ง เพื่อนำไปทดสอบกับเครื่อง MFR (Melt flow rate) ต่อไป เครื่อง MFR มีหลักการทำงานคือ จะให้ความร้อนแก่แท่งเรซิ่นตัวอย่างในกระบอกทดสอบ (Piston) แล้วใช้น้ำหนักกดตามค่าที่กำหนดกดลงบนแท่งกด ทำให้เรซิ่นที่หลอมเหลวอยู่ภายในกระบอกทดสอบไหลผ่านหัวดาย (Die) ออกมา ผลการทดสอบด้วยเครื่อง MFR นอกจากสามารถวัดอัตราการไหลของเรซิ่นแล้ว สามารถระบุอุณหภูมิของเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาสขณะเริ่มอ่อนตัว (Softening temperature)

รูปที่ 2.14 เครื่อง Melt flow rate

ที่มา: http://elecmechpneumatic.tradeindia.com/melt-flow-rate-test-apparatus-3184636.html

2.6 ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) [รศ.ดร.วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543]

ไฟเบอร์กลาสดังรูปที่ 2.15 เป็นวันฤดิบหลักในการผลิตแผ่นพรีเพรก เนื่องจากเป็นวัสดุที่เข้ากันได้ดีกับเรซิ่น เป็นฉนวนไฟฟ้า ไม่ติดไฟ ใช้งานได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูง มีความแข็งแรง และคงสภาพเดิมได้ไม่มีการยืดหยุ่น ไม่บิดงอได้ง่าย เหมาะกับการเป็นฐานสำหรับการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

รูปที่ 2.15 ไฟเบอร์กลาส

ที่มา: https://resin-express.com/wp-content/uploads/2017/06/large_337_Fiberglass_Roll2.jpg

ใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาส จัดเป็นวัสดุผสมที่ประกอบขึ้นจากเส้นใยแก้วทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ในการผลิตเส้นใยแก้วมีส่วนผสมหลักดังนี้ ทรายแก้ว (Silica sand) ใช้เป็นสารสร้างแก้ว หินปูน (Limestone) และโซดาแอช (Soda ash) เป็นตัวช่วยลดจุดหลอมเหลวในการผลิต อาจผสมสารอื่น อาทิ แมกนีไซต์ (Magnesite) ดินขาวเคโอลิน (Kaolin clay) หินฟันม้า (Feldspar) และบอแรกซ์ (Borax) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงคุณภาพในการผลิดไฟเบอร์กลาส

การผลิตไฟเบอร์กลาสเริ่มจากนำทรายแก้ว หินปูน โซดาแอช และสารที่เป็นองค์ประกอบอื่น ๆ ไปเผาในเตาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1000 °C หรือสูงกว่า เป็นเวลา 50 - 900 นาที ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกหลอมละลายเข้าด้วยกัน เรียกว่า น้ำแก้ว จากนั้นจะเป็นกระบวนการรีดเพื่อให้ได้เส้นใยแก้วที่ยาว โดยจะถูกดึงออกจากหัวรีดที่มีขนาดเล็ก แล้วม้วนเก็บด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วของเส้นใยแก้วที่ถูกดึงออกจากหัวรีด ซึ่งเป็นการดึงในขณะที่เส้นใยยังมีความอ่อนตัวอยู่ จึงทำให้ได้เส้นใยแก้วที่มีขนาดเล็กลง เส้นใยแก้วที่ได้จะต้องไม่ขาดง่าย ในโรงงานผลิตเส้นใยแก้วส่วนใหญ่จะตั้งค่าไว้ไม่ให้มีการขาดเกิน 2 ครั้งต่อชั่วโมง ถ้าหากเกินกว่าค่านี้จะถือว่าการผลิตไม่ได้ตามมาตรฐาน หากต้องการตัดเส้นใยแก้วจะทำการตัดด้วยแรงลมในขณะที่เส้นใยยังมีความอ่อนตัวอยู่ ในขั้นตอนการหลอมส่วนผสมต่าง ๆ ในเตาเผานี้ หากไม่มีการควบคุมคุณภาพขององค์ประกอบต่าง ๆ ให้บริสุทธิ์ จะต้องทำการหลอมก่อนหนึ่งครั้งเพื่อทำน้ำแก้วให้เป็นลูกแก้วก่อน แล้วคัดเลือกเอาเฉพาะลูกแก้วที่บริสุทธิ์นำกลับมาหลอมเป็นน้ำแก้วใหม่ แต่ถ้าองค์ประกอบต่าง ๆ มีการควบคุมคุณภาพแล้วก็สามารถรีดเส้นใยจากน้ำแก้วในเตาได้เลย

ไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการผลิตแผ่นพรีเพรกนั้นได้มาจากการนำเส้นใยแก้วแบบ E – glass (Electrical glass) คือชนิดของแก้วที่นำมาทำเป็นเส้นใยแก้วซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำเส้นใยแก้วมาทอเป็นผืนผ้า ที่ขอบของไฟเบอร์กลาสจะมีการเคลือบด้วยสารเคมีที่เรียกว่า Sizing หนาเป็นพิเศษ เพื่อให้เส้นใยต่าง ๆ คงรูป

2.7 น้ำยาวานิช (Varnish) [R. S. Khandpur, 2006]

น้ำยาวานิชคือน้ำยาที่เอาไว้ชุบไฟเบอร์กลาสเพื่อผลิตเป็นแผ่นพรีเพรก คุณสมบัติของน้ำยาวานิชจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของสินค้า เนื่องจากกระบวนการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสูตรน้ำยาวานิช ซึ่งได้จากการนำอีพ็อกซี่เรซิ่นเป็นองค์ประกอบหลัก ผสมกับไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์อีพ็อกซี่เรซิ่นกับตัวทำละลาย และตัวเร่งปฏิกิริยาตามสัดส่วนที่ต้องการ

อีพ็อกซี่เรซิ่นเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซ็ต (Thermosetting polymer) คือเมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วในครั้งแรก จะมีความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก ไม่สามารถคืนรูป และไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีพ็อกซี่เรซิ่นเกิดจากปฏิกิริยาของเรซินกับตัวทำให้แข็ง (Hardener) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกริยาในการเปลี่ยนสภาพเรซิ่นจากพลาสติกเหลว ให้เป็นพลาสติกแข็ง อีพ็อกซี่เรซิ่นมีหลากหลายคุณประโยชน์ในการใช้งาน ส่วนมากในอุตสาหกรรมนิยมนำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสาน (Adhesives) หรือมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พลาสติกเชื่อมประสาน (Plastic adhesives) สามารถเชื่อมประสานแก้ว พลาสติก และโลหะให้เชื่อมติดกันได้ นอกจากนำมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานแล้วยังถูกนำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรมอื่น ๆ อีกด้วยอาทิใช้ในงานซ่อมบำรุงเครื่องจักร เนื่องจากพลาสติกเชื่อมประสานเหล่านี้มีคุณสมบัติในการจับยึดที่แข็งแกร่ง ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี และมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถเจาะหรือตัดได้

น้ำยาวานิชเกิดจากการนำอีพ็อกซี่เรซิ่นผสมกับสารเชื่อมโยง (Curing agent) เพื่อให้ได้สูตรน้ำยาที่คุณสมบัติเป็นกาวเกาะอยู่บนไฟเบอร์กลาส ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาหรืออุณหภูมิขณะทำการเตรียมน้ำยาวานิช เวลาในการเกิดปฏิกิริยาหรือเวลาในการผสมส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน และสารเติมแต่ง (Filler) ที่เติมลงไปในน้ำยาวานิช จะมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำยาวานิชด้วย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของอีพ็อกซี่เรซิ่นจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Molecular orientation) ซึ่งโครงสร้างหลักของอีพ็อกซี่เรซิ่นมีความเสถียรต่อความร้อนสูง เมื่อน้ำยาวานิชได้รับความร้อนประมาณ 180 – 100°C จะเกิดการหลอมเหลวเป็นพลาสติกเหลว แต่เมื่อได้รับความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ ก็จะเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างภายในทำให้ค่อย ๆ แข็งตัวเป็นพลาสติกแข็งในที่สุด (Fully cure) แต่หากลดอุณหภูมิลงก่อนที่จะเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างที่สมบูรณ์ ตัวน้ำยาวานิชก็จะเป็นพลาสติกแข็งที่สามารถหลอมเหลวได้อีกครั้งเมื่อได้รับความร้อน (Semi cured stage) ดังเช่นแผ่นพรีเพรกที่มีการเชื่อมโยงโครงสร้างประมาณ 20% - 30% เท่านั้น จะเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างที่สมบูรณ์ในการผลิตแผ่นลามิเนต

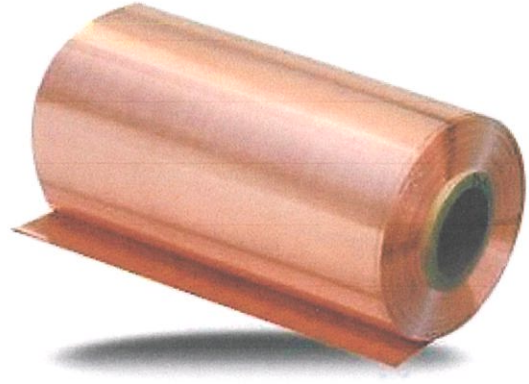
2.8 แผ่นทองแดง (Copper foil) [Clyde F. Coombs, JR, 2008]

ทองแดงสามารถนำไฟฟ้าได้ดีรองจากเงิน จึงมีการใช้ทองแดงอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ความสามารถในการนำไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทองแดงมีการเจือปนกับโลหะผสมอื่น ทองแดงสามารถอัด รีด ขึ้นรูปได้เมื่อได้รับความร้อน ความหนาของแผ่นทองแดงส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้า และความแข็งแรง

ความแตกต่างของแผ่นทองแดงที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ คือความสามารถและข้อจำกัดในการใช้งานของแผ่นทองแดง แผ่นทองแดงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่สองประเภทคือ แผ่นทองแดงที่ได้จากการรีด (Rolled copper) และแผ่นทองแดงที่ได้จากการชุบ (Electro-deposited copper: ED) ความแตกต่างของแผ่นทองแดงทั้งสองชนิดนี้เมื่อมองถึงตัวแปรที่ใช้ในการผลิตมีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นการนำไปใช้งานจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับงานที่ผลิต

แผ่นทองแดงที่ทางบริษัทใช้คือ แผ่นทองแดงที่ผลิตได้จากการชุบ หรือแผ่นทองแดง ED เนื่องจากมีการพัฒนาคุณสมบัติต่าง ๆ อาทิ ความขรุขระบนพื้นผิว (Surface roughness) และโครงสร้างเกรน (Grain structure) เป็นต้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นทองแดงที่ได้จากการรีดจะพบว่า แผ่นทองแดงที่ได้จากการชุบจะให้โครงสร้างเกรนที่แน่นอน ความขรุขระบนพื้นผิวสม่ำเสมอกว่า และมีการเชื่อมโยงพันธะภายในโครงสร้างที่ดีกว่า

นอกจากนี้แผ่นทองแดงที่ได้จากการชุบยังสามารถแบ่งได้อีกหลายแบบตามกรรมวิธีการผลิต เช่น แผ่นทองแดงชนิด HTE คือแผ่นทองแดงที่มีการพัฒนาค่าการยืดตัวที่อุณหภูมิ 180°C (High temperature elongation) ซึ่งช่วยลดการแตก (Cracking) ภายในแผ่นทองแดงขณะทำการลามิเนชัน และมีความอ่อนตัวเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.16 แผ่นทองแดง

ที่มา: http://i.ebayimg.com/00/s/MjAzWDMwMA==/z/Vv8AAOSwEK9UB5Bb/$_35.JPG?set_id=2

2.9 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

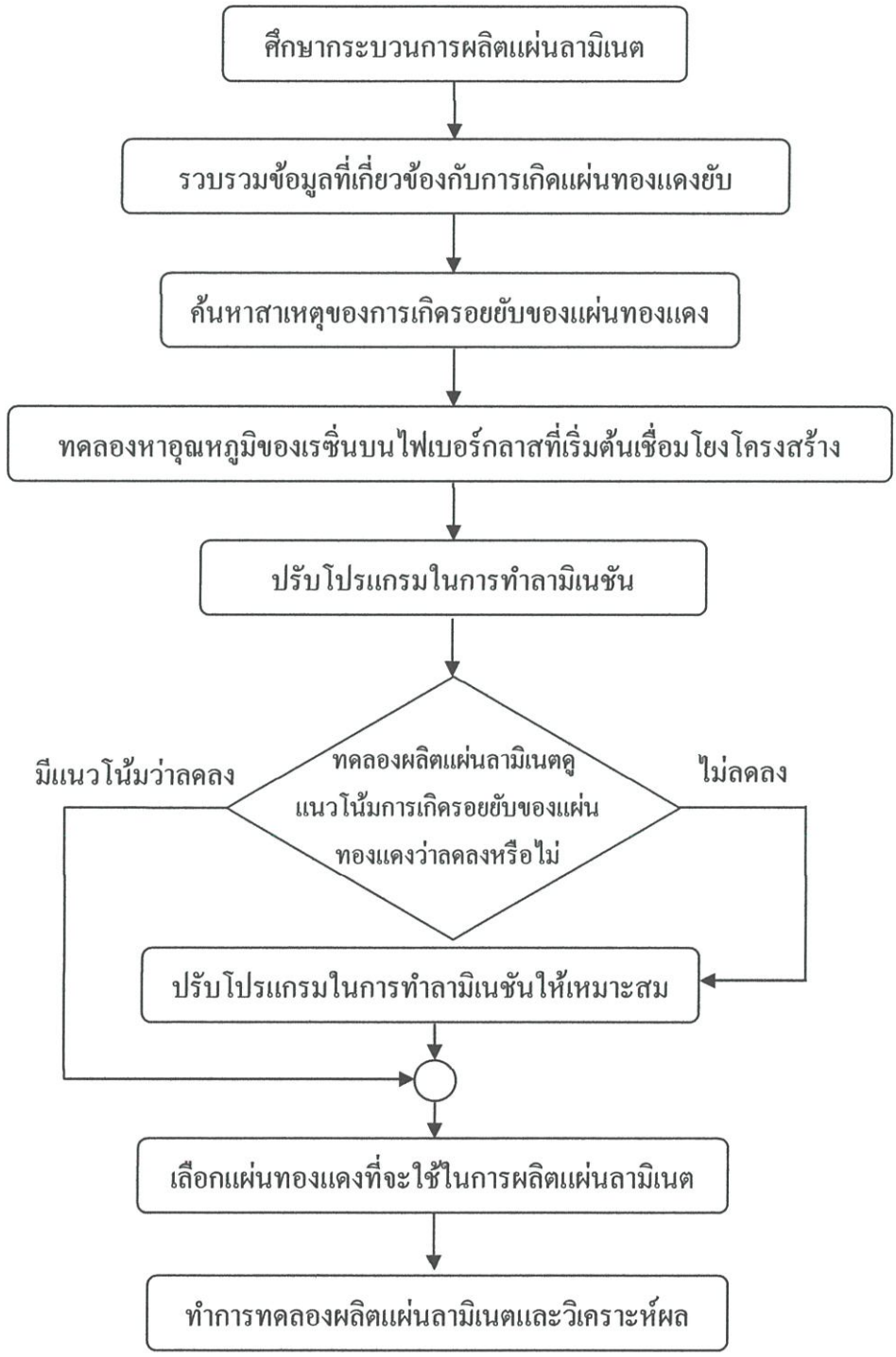
จากเอกสารของบริษัท Shenzhen Core -Tex Composite Materials Co., Ltd ผู้ผลิตไฟเบอร์-กลาส แผ่นทองแดง พรีเพรก และแผ่นลามิเนตรายใหญ่ในประเทศจีน กล่าวถึงการเกิดแผ่นทองแดงยับว่าอาจเกิดจากขั้นตอนการจัดเรียง (Lay up) โดยเฉพาะการผลิตแผ่น ลามิเนตด้วยแผ่นทองแดงบาง ๆ (18 μm หรือต่ำกว่า) หากมีการจัดเรียงด้วยพนักงานอย่างน้อยต้องใช้พนักงานจำนวน 2 คน ซึ่งการทำงานอาจไม่สอดคล้องกันทำให้การวางแผ่นทองแดงอาจเกิดการยับได้ และหากการจัดเรียงทำร่วมกันระหว่างพนักงานและเครื่องจักร (Semi-automatic) อาจมีฝุ่นผงจากการตัดพรีเพรกปะปนมากับ แผ่นพรีเพรกที่ต้องการจัดเรียง นอกจากนี้ต้องตรวจสอบความสะอาดของแผ่นแสตนเลส (Caul plate) และสายพานลำเลียงวัตถุดิบทั้งหมด โดยควรตรวจสอบเป็นประจำทุกครั้งที่มีการผลิต เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแผ่นทองแดงยับ ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าไม่มีสิ่งปนเปื้อนในการจัดเรียง ควรตรวจสอบแรงดึงของเครื่องจักร (ค่า Tension) ในการดึงแผ่นทองแดงออกมาจากม้วนว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ เนื่องจากแผ่นทองแดงบางมาก การใช้แรงดึงที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดแผ่นทองแดงยับได้

สำหรับแผ่นทองแดงที่มีความบางมาก ๆ (18 μm หรือต่ำกว่า) ระหว่างกระบวนการทำลามิ-เนชัน (Lamination process) ถ้าเรซิ่นเกิดการไหลเป็นจำนวนมาก และเมื่อสิ้นสุดการทำลามิเนชันแล้วพบว่ามีเรซิ่นออกมาจากขอบของแผ่นทองแดง ก็อาจทำให้พบการเกิดแผ่นทองแดงยับได้ จึงควรตรวจสอบและปรับปรุงสูตรน้ำยาวานิชหรือปรับโปรแกรมในการทำลามิเนชัน

ในส่วนของแผ่นทองแดงสำหรับแผ่นทองแดงที่มีความบางมาก ๆ ควรเลือกใช้แผ่นทองแดงชนิด HTE เนื่องจากมีค่าความเหนียวที่อุณหภูมิสูงระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถลดการเกิดแผ่นทองแดงยับได้ [R. S. Khandpur, 2006]

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาปัญหาการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนตประกอบด้วยขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษากระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต

ศึกษากระบวนการผลิตแผ่นลามิเนตซึ่งประกอบด้วย กระบวนการผลิตพรีเพรก และกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนต เนื้อหาของกระบวนการผลิตโดยทั่วไปได้กล่าวเอาไว้แล้วในบทที่ 2 และเข้าไปสังเกตการในกระบวนการผลิตของบริษัท เพื่อหาสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงบนแผ่นลามิเนต

3.2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

รวบรวมข้อมูลในการผลิตแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงย้อนหลังเป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 เพื่อกำหนดขอบเขตการทำวิจัย และศึกษาลักษณะการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

3.3 ค้นหาสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

จัดทำแผนผังแสดงสาเหตุและผลเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ว่าจะส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง โดยใช้หลักการ 4M เป็นตัวกำหนดกลุ่มปัจจัย (Factors) ที่จะนำไปสู่การหาสาเหตุย่อยต่อไป จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัดสาเหตุที่ไม่ส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงออก แล้วเลือกสาเหตุที่คาดว่าจะส่งผลต่อการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมากที่สุด เหมาะสมต่อเวลาที่ทำการศึกษาและไม่กระทบต่อกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนตของทางบริษัท

3.4 ทดลองหาอุณหภูมิของเรซิ่นบนไฟเบอร์กลาสที่เริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้างกัน

นำพรีเพรกที่ผลิตได้ในแต่ละสูตรน้ำยาวานิชไปขยำให้เรซิ่นที่เคลือบอยู่บนไฟเบอร์กลาสหลุดออกมา จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง DSC (Differential scanning calorimeter) เพื่อหาอุณหภูมิเริ่มต้นที่เรซิ่นเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้าง (Starting cure temperature) และขอข้อมูลอุณหภูมิที่เรซิ่นเริ่มอ่อนตัว (Softening temperature) ในแต่ละสูตรน้ำยาวานิชจากแผนกตรวจสอบคุณภาพพรีเพรก เพื่อเป็นข้อมูลในการปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันต่อไป

3.5 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชัน

3.5.1 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 โดยการเพิ่มความดันให้ถึง 250 psi ก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะอ่อนตัว ประมาณ 5 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มความดัน 30 psi ต่อนาที และเพิ่มความดันให้ถึงความดันสูงสุด 370 psi ก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะเริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้าง ประมาณ 5 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มความดัน 30 psi ต่อนาที จากนั้นคงความดันไว้ที่ 370 psi จนกว่า

อุณหภูมิแผ่นลามิเนตจะอยู่ในช่วง 180-200 °C จึงลดความดันลงเท่ากับ 100 psi แล้วทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY

3.5.2 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2 โดยการเพิ่มความดันให้ถึง 250 psi ก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะอ่อนตัว ประมาณ 5 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มความดัน 30 psi ต่อนาที และเพิ่มความดันให้ถึงความดันสูงสุดประมาณ 370 psi ก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะเริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้าง ประมาณ 5 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มความดัน 30 psi ต่อนาที จากนั้นคงความดันไว้ที่ 370 psi จนจบการทำลามิเนชัน แล้วทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 และ 072 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ตามลำดับ

3.6 เลือกแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนต

เลือกแผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%Elongation) ที่อุณหภูมิ 180°C สูงสุด (10.1-10.4) และต่ำสุด (6.1-6.9) ในล็อต XXX มาทำลามิเนชันโดยใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ เพื่อดูแนวโน้มว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดงส่งผลต่อการเกิดแผ่นทองแดงยับอย่างไร แล้วจึงเลือกใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าการยืดตัวที่ทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงน้อยที่สุดมาทำการผลิตแผ่นลามิเนตต่อไป

3.7 ตัดขอบไฟเบอร์กลาส

เนื่องจากการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมักเริ่มเกิดจากบริเวณขอบของแผ่นลามิเนต ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำยาวานิชไม่สามารถซึมเข้าสู่เส้นใยไฟเบอร์กลาสได้ จึงทดลองตัดขอบไฟเบอร์กลาสจากนั้นนำไปผลิตเป็นแผ่นพรีเพรกเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นลามิเนต โดยใช้โปรแกรมในการทำลามิเนชันเดิมของทางบริษัท เพื่อดูแนวโน้มว่าขอบของไฟเบอร์กลาสมีผลต่อการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงหรือไม่

3.8 ทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตและวิเคราะห์ผล

ในการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตแบ่งออกเป็น 5 แบบ คือ

แบบที่ 1 ใช้การปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 1 ในการทดลองผลิตแผ่นลามิเนต ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY

แบบที่ 2 ใช้การปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 ในการทดลองผลิตแผ่นลามิเนต ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 และ 072 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ตามลำดับ

แบบที่ 3 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 และ 072 โดยใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่อุณหภูมิ 180 °C สูงสุด (10.1-10.4) และต่ำสุด (6.1-6.9) ในล็อต XXX และใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้

แบบที่ 4 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 063, 264, 072 และ 262โดยใช้การปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่อุณหภูมิ 180°C

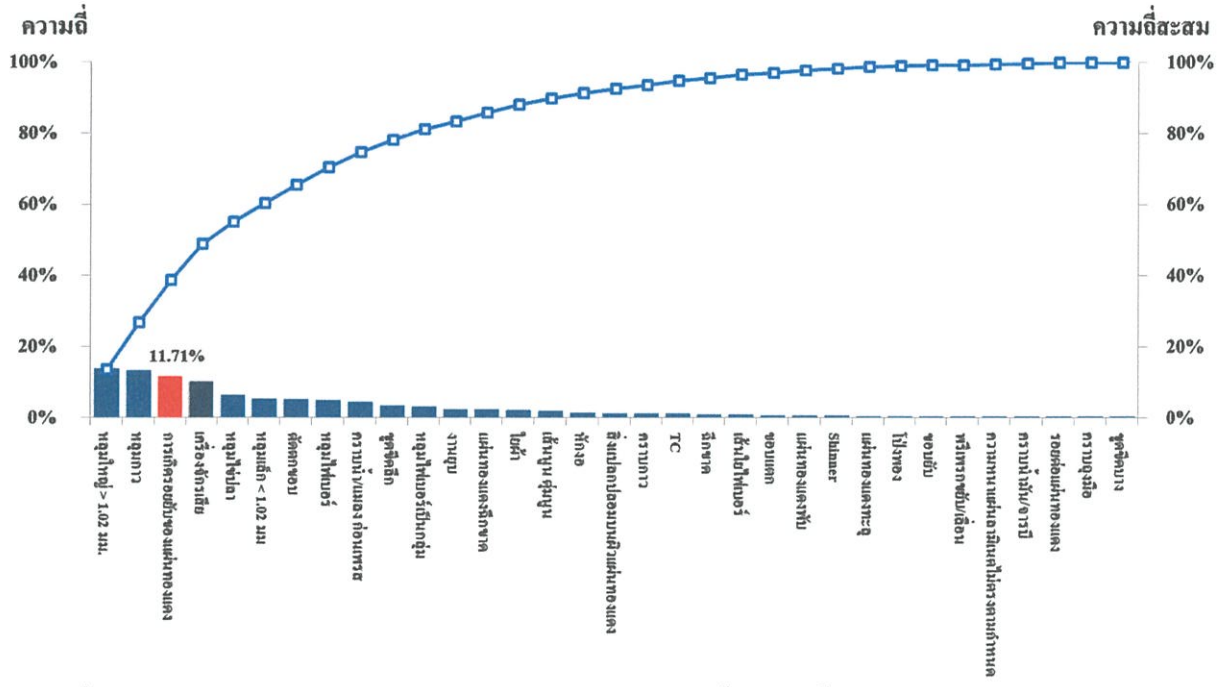
แบบที่ 5 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 โดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์-กลาส ที่ไม่มีขอบ ใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC และใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นทองแดงยับ

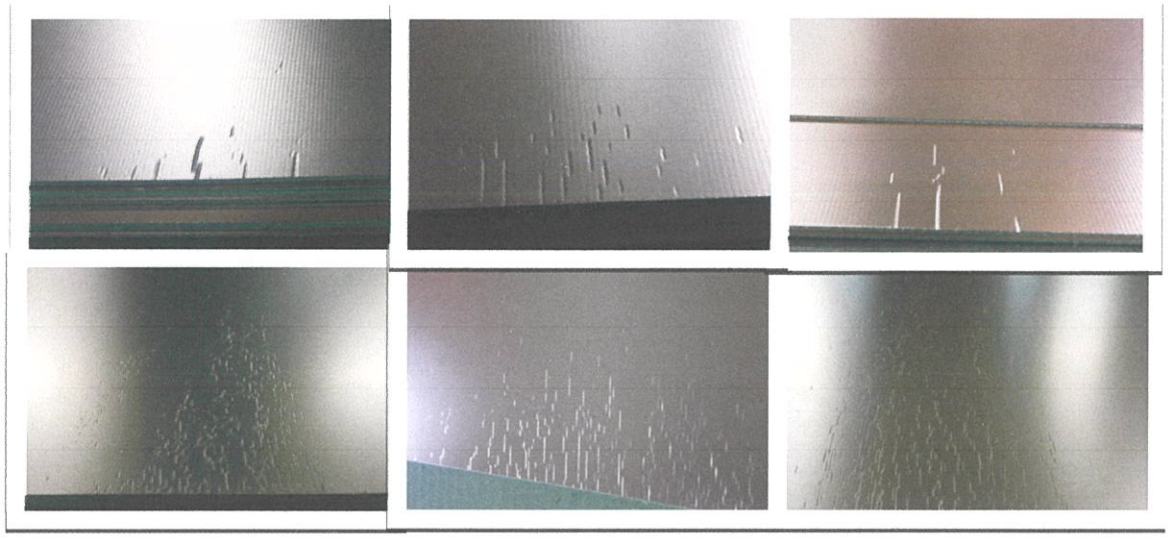
4.1.1 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในการผลิตแผ่นลามิเนตดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 พาเรโตชนิดของเสียที่เกิดจากการผลิตแผ่นลามิเนตทั้งหมด ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560

จากรูปที่ 4.1 แผนภาพพาเรโตชนิดของเสียที่เกิดจากการผลิตแผ่นลามิเนต พบว่าข้อมูลของเสียสะสม 80% มาจาก หลุมใหญ่ที่มีขนาดมากกว่า 1.02 มม. หลุมกาว การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เครื่องจักรเสีย หลุมไข่ปลา หลุมเล็กที่มีขนาดน้อยกว่า 1.02 มม. ตัดตกขอบ หลุมไฟเบอร์ คราบน้ำหรือแมลงก่อนเพรส ขูดขีดลึก และหลุมไฟเบอร์เป็นกลุ่ม ซึ่งของเสียที่มาจากการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเป็นของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดเป็นลำดับที่ 3 และอยู่ในความรับผิดชอบของแผนกวิศวกรรมกระบวนการผลิตที่ผู้วิจัยทำการศึกษาอยู่ จึงเลือกศึกษาปัญหานี้ ส่วนการเกิดของเสียชนิดอื่นนั้นมีแผนกที่เป็นผู้รับผิดชอบดูแลอยู่แล้ว เช่น หลุมใหญ่ที่มีขนาดมากกว่า 1.02 มม. และหลุมกาว แผนกการผลิตเป็นผู้ดูแลรับผิดชอบ และพยายามลดของเสียที่เกิดขึ้น

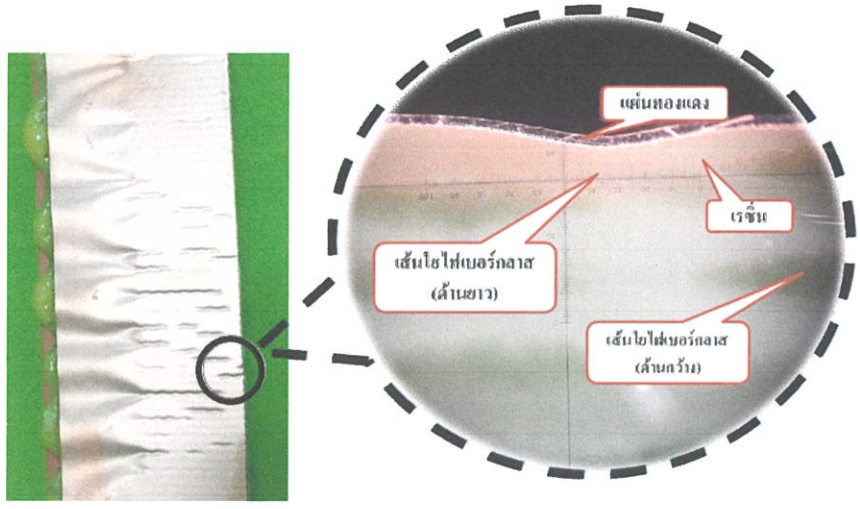
4.1.2 แผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

แผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง มีลักษณะคล้ายรอยถูกขีดเป็นทางยาวตามร่องเส้นใยไฟเบอร์กลาส ซึ่งรอยขีดนี้มีทั้งรอยขีดขนาดเล็กและขนาดใหญ่ อาจมีเพียงรอยขีดเดียวหรือเกิดเป็นกลุ่ม มักเกิดตั้งแต่ขอบของชิ้นงานเข้าไปด้านใน มีส่วนน้อยที่เริ่มต้นเกิดจากตรงกลางแผ่นลามิเนต การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงส่วนมากพบที่แผ่นทองแดงด้านบนมากกว่าแผ่นทองแดงด้านล่าง ตำแหน่งการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง สามารถพบได้ทั่วทั้งแผ่นลามิเนตทุกตำแหน่ง การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมีลักษณะการเกิดแบบสุ่ม คือในการผลิตแผ่นลามิเนตหนึ่งครั้งอาจไม่พบการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเลย บางครั้งอาจพบเพียงหนึ่งถึงสองแผ่น แต่ในบางครั้งอาจพบมากถึงห้าสิบแผ่นได้ ทั้งที่ทำการผลิตแผ่นลามิเนตด้วยโปรแกรมการทำลามิเนชันเหมือนกัน สายการผลิตเดียวกัน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมาจากแหล่งเดียวกัน ผลิตงานชนิดเดียวกัน

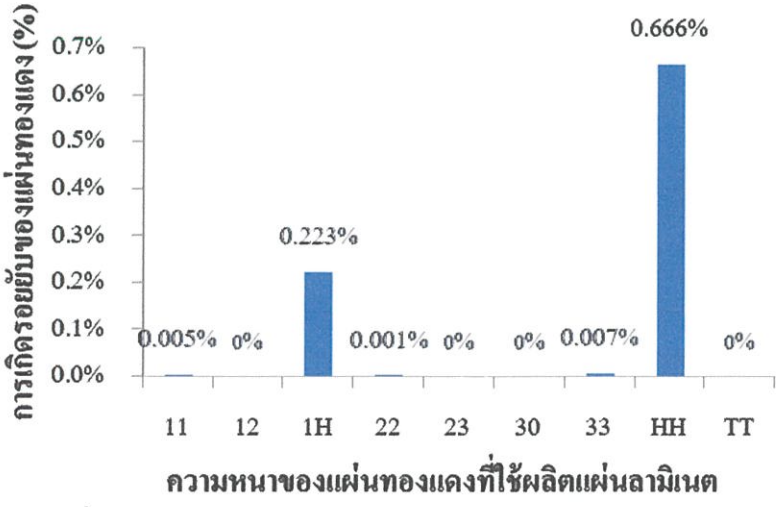
4.1.3 ผลจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ดูลักษณะแผ่นลามิเนต ณ ตำแหน่งที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางแผ่นลามิเนต ณ ตำแหน่งที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 500 เท่า

จากรูปที่ 4.3 เมื่อนำขอบแผ่นลามิเนต ณ ตำแหน่งที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงไปส่องใต้กล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า พบว่า แผ่นทองแดงแนบสนิทไปกับไฟเบอร์กลาส ซึ่งบริเวณนี้ยังคงมีเรซิ่นอยู่ ไม่พบฟองอากาศหรือสิ่งปนเปื้อนใด ๆ ในเนื้อแผ่นลามิเนต

4.1.4 ความหนาของแผ่นทองแดงที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงแสดงดังรูปที่ 4.4

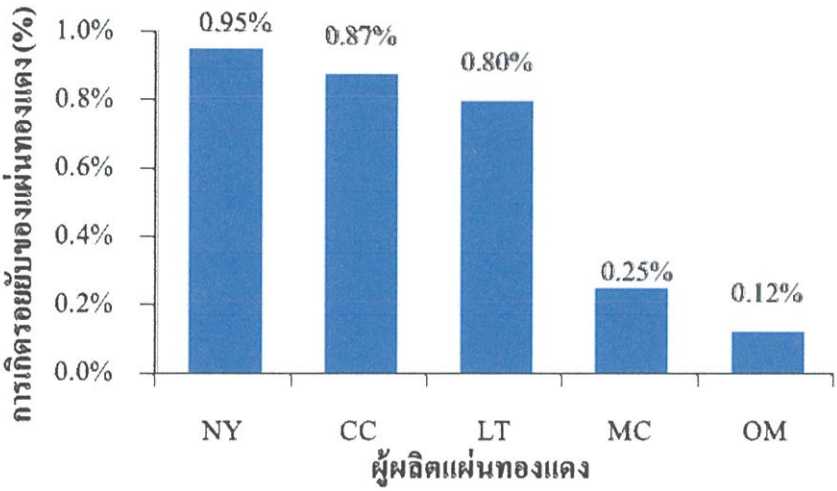


Code	ความหนา (µm)
H	18
1	35
T	52
2	70
3	105

รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละความหนาของแผ่นทองแดงที่ใช้ผลิตแผ่นลามิเนต (เก็บข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560)

จากรูปที่ 4.4 เมื่อผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้แผ่นทองแดงที่มีความหนา 18 μm ทั้งสองด้าน (HH) มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงสูงสุดเท่ากับ 0.67% ของจำนวนการผลิตแผ่นลามิเนตทั้งหมด รองลงมาคือการผลิตแผ่นลามิเนตที่ด้านหนึ่งใช้แผ่นทองแดงความหนา 35 μm และอีกด้านใช้แผ่นทองแดงความหนา 18 μm (1H) มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.63% ซึ่งพบว่าการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงส่วนใหญ่เกิดบนแผ่นลามิเนตในด้านที่ใช้แผ่นทองแดงความหนา 18 μm ดังนั้นจึงทำการศึกษาเฉพาะการผลิตแผ่นลามิเนตที่ใช้แผ่นทองแดงความหนา 18 μm ทั้งสองด้าน (HH)

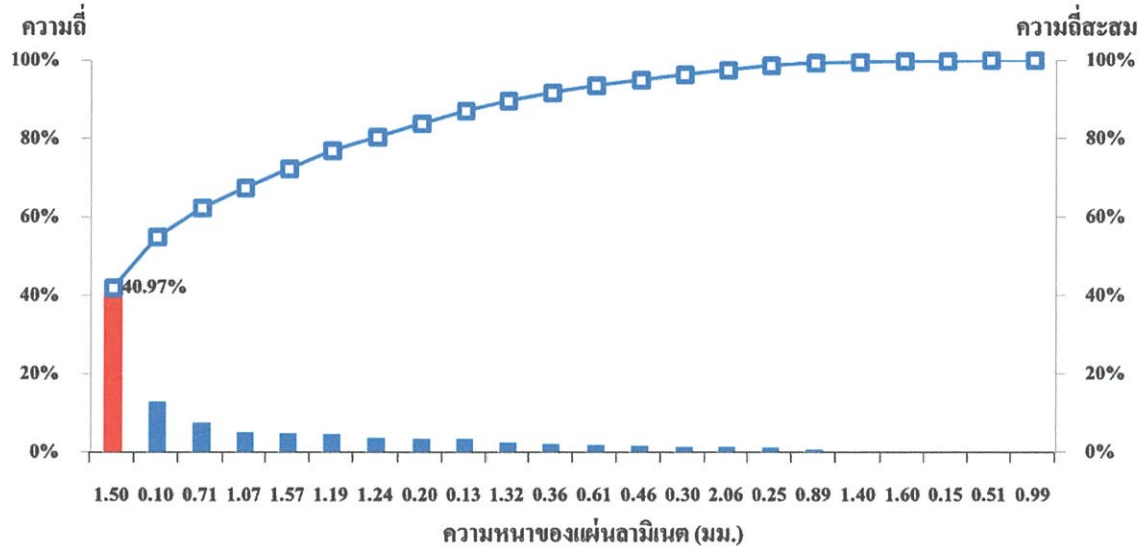
4.1.5 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิตแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิตแผ่นทองแดง เมื่อใช้แผ่นทองแดงความหนา 18 μm ทั้งสองด้าน (เก็บรวบรวมข้อมูลตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560)

จากรูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้แผ่นทองแดงความหนา 18 μm ทั้งสองด้าน จากผู้ผลิต NY CC และ LT มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงสูงถึง 0.95%, 0.87% และ 0.80% ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต MC และ OM มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเพียง 0.25% และ 0.12% ตามลำดับ ดังนั้นจึงทำการศึกษาเฉพาะการผลิตแผ่นลามิเนตที่ใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY CC และ LT เท่านั้นเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงลดลง

4.1.6 ความหนาของแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพพาเรโตความหนาของแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560

จากรูปที่ 4.6 แผนภาพพาเรโตความหนาของแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง จะเห็นว่าการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเกิดขึ้นได้ทั้งในแผ่นลามิเนตที่มีความหนาและบาง 80% ของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมาจากการผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50, 0.10, 0.71, 1.07, 1.57, 1.19 และ 1.24 มม. ดังนั้นจึงสนใจศึกษาแผ่นลามิเนตที่มีความหนา 1.50 มม. เพื่อหาแนวทางในการลดการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง แต่เนื่องจากผู้วิจัยต้องทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตเพื่อจำหน่าย ซึ่งจะทดลองผลิตแผ่นลามิเนตได้ก็ต่อเมื่อมีคำสั่งซื้อจากลูกค้าเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถกำหนดความหนาของแผ่นลามิเนตที่ต้องการผลิตได้ และด้วยระยะเวลาในการศึกษาที่จำกัดจึงไม่สามารถศึกษาแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. เพียงอย่างเดียวได้ ประกอบกับโปรแกรมที่ใช้ในการทำลามิเนชัน สามารถใช้ได้กับการผลิตแผ่นลามิเนตในช่วงความหนาที่ 1.14 - 2.06 มม. ผู้วิจัยจึงทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตที่ช่วงความหนาดังกล่าว

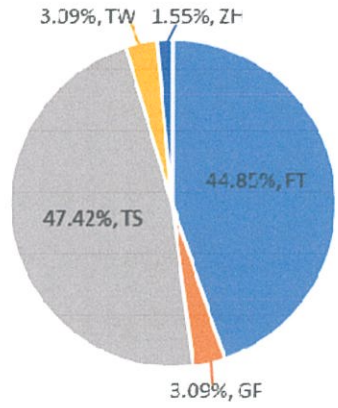
4.1.7 ข้อมูลคุณสมบัติของเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส

ในการผลิตพรีเพรกมีการตรวจสอบคุณภาพโดยการนำพรีเพรกมาขยำให้เรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาสหลุดออกมา จากนั้นนำผงเรซิ่นไปทดสอบด้วยเครื่อง Melt flow rate หรือเครื่องทดสอบอัตราการไหลของเรซิ่น เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้ผงเรซิ่นเริ่มอ่อนตัว แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิของเรซิ่นที่เริ่มอ่อนตัวในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช

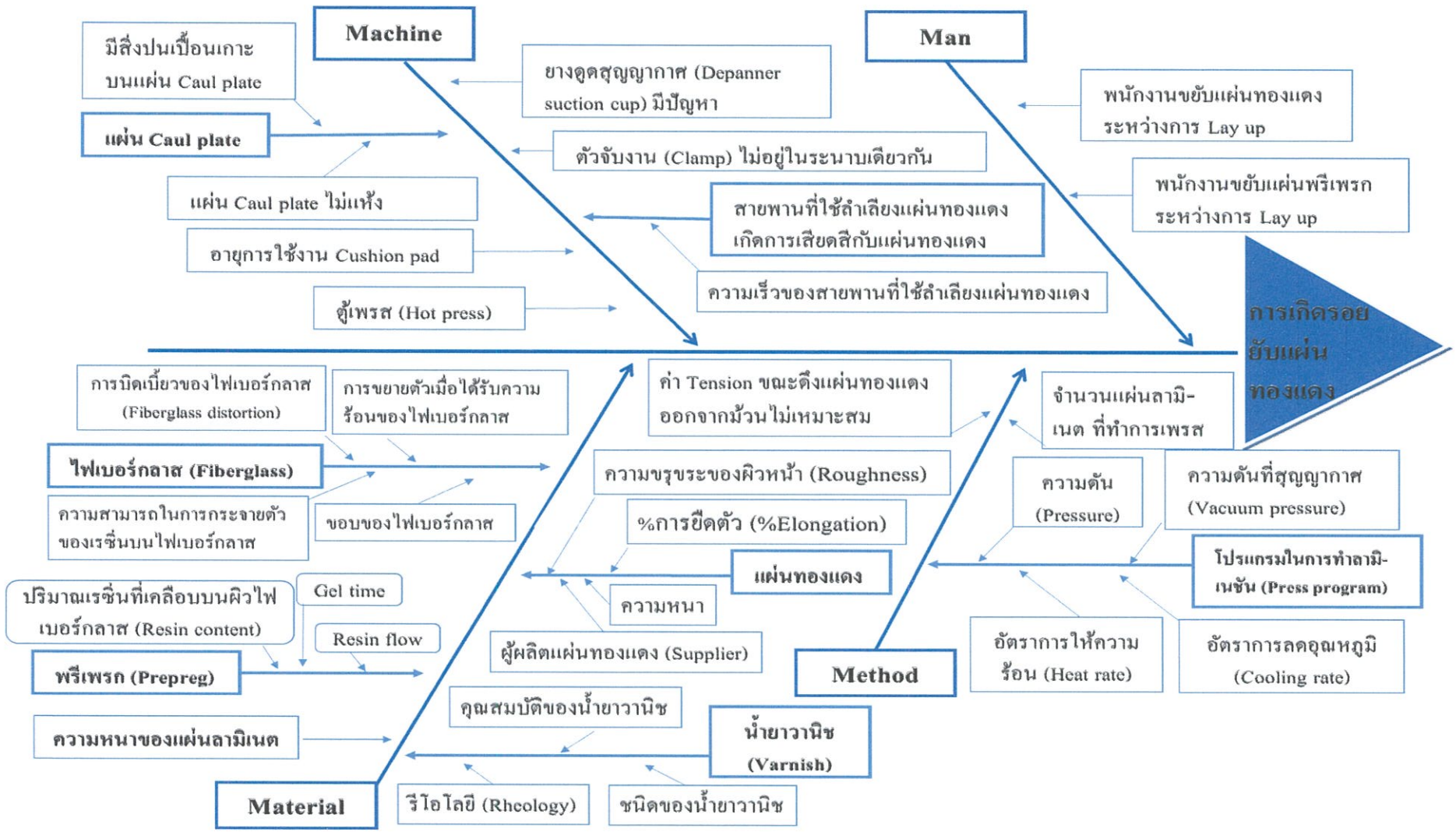
สูตรน้ำยาวานิช	อุณหภูมิที่เรซิ่นเริ่มอ่อนตัว (°C)
063	81.6
072	80.1
162	78.5
262	79.4
264	81.0

4.1.8 ชนิดไฟเบอร์กลาสที่ใช้ในการผลิตแผ่นลามิเนตแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์การผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้ไฟเบอร์กลาสแต่ละชนิด ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560

จากรูปที่ 4.7 การผลิตแผ่นลามิเนตของทางบริษัทส่วนใหญ่ใช้ไฟเบอร์กลาสจากผู้ผลิต FT และ TS เพื่อป้องกันการผูกขาดวัตถุดิบจากบริษัทผู้ผลิตไฟเบอร์กลาสเพียงบริษัทเดียว ประกอบกับขณะทำการศึกษาบริษัทได้สั่งซื้อไฟเบอร์กลาสทั้งสองชนิดนี้เก็บไว้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตจึงเลือกใช้ไฟเบอร์กลาสจากผู้ผลิต FT และ TS



รูปที่ 4.8 แผนผังแสดงสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

4.2 แผนผังแสดงสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

แผนผังแสดงสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงดังรูปที่ 4.8 ได้กำหนดปัจจัย (Factors) โดยใช้หลัก 4M ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมีดังนี้

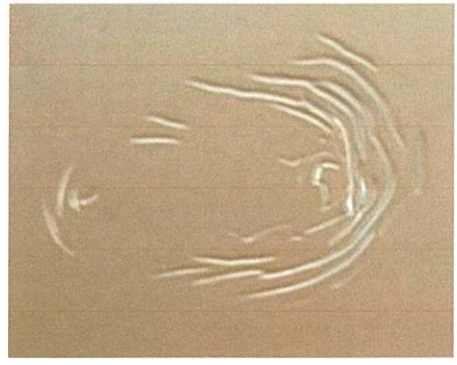
4.2.1 Man (พนักงาน)

ขั้นตอนการผลิตแผ่นลามิเนตที่พนักงานมีส่วนเกี่ยวข้องแล้วอาจเป็นสาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงได้มากที่สุด คือขั้นตอนการจัดเรียง หรือ Lay up เนื่องจากพนักงานอาจทำการขยับแผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรกในการจัดเรียง แต่เมื่อทำการศึกษากระบวนการผลิตจริงในโรงงานพบว่ากระบวนการผลิตแผ่นลามิเนตเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semiautomatic) คือมีการใช้เครื่องจักรในการจัดเรียงแผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรก พนักงานมีหน้าที่คอยควบคุมเครื่องจักรให้ปฏิบัติตามคำสั่ง และสังเกตการทำงานของเครื่องจักรเพียงเท่านั้น พนักงานจะมีการขยับแผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรกก็ต่อเมื่อเครื่องจักรทำงานไม่ตรงตามคำสั่งที่ตั้งค่าไว้ ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมาก จากการเข้าไปสังเกตการทำงานของพนักงาน เมื่อมีการขยับแผ่นทองแดงขณะทำการจัดเรียงแผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรก พบว่าแผ่นลามิเนต ณ ตำแหน่งที่มีการขยับแผ่นทองแดง ไม่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงบนแผ่นลามิเนตแต่อย่างใด ปัจจุบันบริษัทได้ออกข้อกำหนดในการปฏิบัติงาน ในเรื่องการขยับแผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรกให้พนักงานทุกคนปฏิบัติตาม เพื่อควบคุมการทำงานของพนักงานและควบคุมตัวแปรในการผลิตที่อาจจะส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

4.2.2 Machine (เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวก)

เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงมีดังนี้

ยางดูดสุญญากาศ (Depanner suction cup) เมื่อยางดูดสุญญากาศมีปัญหา จะทำให้เกิดรอยบนแผ่นลามิเนต ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผ่นลามิเนตเมื่อยางดูดสุญญากาศมีปัญหา

จากรูปที่ 4.8 แผนผังแสดงสาเหตุและผลของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ในหัวข้อที่ระบุว่ายางดูดสุญญากาศมีปัญหา ซึ่งคาดว่าอาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงนั้น ไม่เป็นจริง เนื่องจากรูปที่ 4.9 ลักษณะรอยที่เกิดขึ้นบนแผ่นลามิเนตเมื่อยางดูดสุญญากาศมีปัญหา มีความแตกต่างจากลักษณะการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงที่แสดงดังรูปที่ 4.2

ตัวจับงาน (Clamp) ไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน เมื่อวางแผ่นทองแดงและแผ่นพรีเพรก ขณะทำการจัดเรียง จึงเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงบนแผ่นลามิเนต ได้ทำการทดลองปรับระนาบตัวจับงานให้อยู่ในระนาบเดียวกันมาแล้ว พบว่าปริมาณการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงไม่ลดลง และยังคงเกิดขึ้นในปริมาณที่เท่าเดิม ดังนั้นระนาบของตัวจับงานจึงไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง แต่ในทางปฏิบัติได้มีการตรวจสอบตัวจับงานให้อยู่ในระนาบเดียวกันอยู่เสมอ เพื่อควบคุมการผลิตให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน

สายพานที่ใช้ลำเลียงแผ่นทองแดงเกิดการเสียดสีกับแผ่นทองแดง ส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนต ได้ทำการทดลองปรับลดความเร็วของสายพานลำเลียงแผ่นทองแดงจาก 25 เมตรต่อนาที เป็น 17 เมตรต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วต่ำที่สุดที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้มาแล้ว เนื่องจากคาดว่าความเร็วของสายพานลำเลียงที่เร็วเกินไปอาจทำให้แผ่นทองแดงเกิดการเสียดสีกับสายพานได้ และอาจเกิดการยับย่นขณะลำเลียง เนื่องจากแผ่นทองแดงที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงส่วนใหญ่บางมาก ๆ คือมีความหนาเพียง 18 μm เท่านั้น ผลการทดลองลดความเร็วของสายพานลำเลียงแผ่นทองแดงพบว่า เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในปริมาณที่เท่าเดิม ดังนั้นความเร็วของสายพานลำเลียงแผ่นทองแดงจึงอาจไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ปัจจุบันทางบริษัทใช้ความเร็วในการลำเลียงแผ่นทองแดงอยู่ที่ 25 เมตรต่อนาที เนื่องจากทางบริษัทมีการผลิตสินค้าตลอด 24 ชั่วโมง หากใช้ความเร็วในการลำเลียงแผ่นทองแดงช้าเกินไป จะทำให้ขั้นตอนการทำงานในส่วนอื่น ๆ เกิดความล่าช้าตามไปด้วย ส่งผลให้การส่งสินค้าแก่ลูกค้าไม่ทันตามกำหนด

จากรูปที่ 4.8 ในหัวข้อย่อยที่ระบุว่าแผ่น Caul plate มีสมมุติฐานว่า มีหยดน้ำและสิ่งปนเปื้อนเกาะอยู่บนแผ่น Caul plate ส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง จากการเข้าไปสังเกตการณ์ในกระบวนการผลิตพบว่าแผ่น Caul plate ที่ผ่านเครื่องทำความสะอาด (Scrubber) ส่วนมากจะแห้งมามีน้ำเกาะอยู่บนแผ่นลามิเนตมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่มีหยดน้ำเล็ก ๆ เกาะอยู่ตรงขอบแผ่น Caul plate ซึ่งไม่สัมผัสกับแผ่นทองแดงหรือแผ่นพรีเพรก และไม่พบสิ่งปนเปื้อนติดอยู่บนแผ่น Caul plate เพราะหากมีสิ่งปนเปื้อนเกาะอยู่ต้องมีขนาดใหญ่พอที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า จึงจะสามารถทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงได้ และได้ติดตามดูผลการผลิตแผ่นลามิเนต ณ ตำแหน่งที่พบว่า มีหยดน้ำเล็ก ๆ เกาะอยู่บนแผ่น Caul plate พบว่าไม่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ดังนั้น แผ่น Caul plate ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จึงไม่ใช่สาเหตุในการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ปัจจุบันมีการควบคุมการล้างแผ่น Caul plate โดยการปรับปรุงเครื่องทำความสะอาดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น พนักงานมีการตรวจเช็คอุณหภูมิของเครื่องเป่าลมร้อนก่อนการใช้งานทุกครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าแผ่น Caul plate ที่ผ่านเครื่องทำความสะอาดแล้วจะแห้งสนิท และมีการบำรุงรักษา ทำความสะอาดเครื่องทำความสะอาดเป็นประจำทุกสัปดาห์

อายุการใช้งาน Cushion pad ที่ไม่เหมาะสมทำให้การกระจายความร้อนในขณะทำลามิเนชันไม่สม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพลดลง อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง จากการศึกษาที่ผ่านมาของทางบริษัทพบว่า เมื่อใช้ Cushion pad แผ่นใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานในการผลิตแผ่นลามิเนตปริมาณการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงยังคงเกิดในปริมาณที่เท่าเดิมกับเมื่อใช้ Cushion pad แผ่นเก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหลายครั้ง ดังนั้นอายุการใช้งาน Cushion pad ไม่ใช่สาเหตุของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ปัจจุบันได้กำหนดให้ใช้ Cushion pad เพียง 1,000 ครั้ง จึงเปลี่ยนใหม่ เนื่องจากราคา Cushion pad มีราคาสูงจึงต้องการใช้งานให้เกิดความคุ้มค่าให้สูงที่สุด

จากรูปที่ 4.8 ในหัวข้อย่อยที่ระบุว่า ตู้เพรส (Hot press) อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เนื่องจากระยะเวลาในการทำงานที่จำกัด ทำให้ผู้วิจัยไม่ได้ทำการศึกษาสาเหตุนี้ และบริษัททำการผลิตแผ่นลามิเนตจำหน่ายตลอด 24 ชั่วโมง จึงเป็นการยากที่จะทำการศึกษาตู้เพรส ดังนั้นในการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตจึงตั้งสมมุติฐานว่า ตู้เพรสทุกตู้มีประสิทธิภาพการทำงานเท่าเทียมกัน และทำตามโปรแกรมควบคุมได้อย่างดี

4.2.3 Material (วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์)

ในการผลิตแผ่นลามิเนตมีวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ที่อาจส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงดังนี้

ไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นพรีเพรก ซึ่งสมบัติที่คาดว่าจะทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงคือ การบิดเบี้ยวของไฟเบอร์กลาส (Fiberglass distortion) การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของไฟเบอร์กลาส (Thermal expansion) ความสามารถในการกระจายตัวของเรซิ่นบนไฟเบอร์กลาส (Fiberglass wettability) และขอบของไฟเบอร์กลาส

น้ำยาวานิช (Varnish) ได้มาจากการผสมกันของเรซิ่นและตัวทำละลายต่าง ๆ ตามองค์ประกอบที่ทางบริษัทกำหนด ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการผลิตแผ่นพรีเพรก ในแต่ละสูตรน้ำยาวานิชเหมาะกับการนำไปใช้ผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกัน ทำให้มีความแตกต่างด้านการนำไปใช้งานของแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ น้ำยาวานิชมีหน้าที่เป็นเสมือนกาวให้ไฟเบอร์กลาสและแผ่นทองแดงแนบติดกัน โดยชั้นของเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส

มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า คุณสมบัติของน้ำยาวานิชที่คาดว่าจะทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงคือ รีโอโลยี (Rheology) หรือพฤติกรรมการไหลของเรซิ่นเมื่อได้รับความร้อนจนกลายเป็นของเหลว ชนิดและองค์ประกอบของน้ำยาวานิชในแต่ละสูตร

แผ่นพรีเพรก (Prepreg) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแผ่นลามิเนต คุณสมบัติของแผ่นพรีเพรก ที่คาดว่าจะทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงคือ ปริมาณเรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาส (Resin content) ค่า Gel time หรือระยะเวลาที่ทำให้เรซิ่นที่เคลือบบนผิวไฟเบอร์กลาสเมื่อได้รับความร้อนจนกลายเป็นของเหลวแล้ว เกิดการแข็งตัวกลับมาเป็นของแข็งอีกครั้ง และปริมาณเรซิ่นที่ไหลออกเมื่อถูกให้ความร้อนและอัดด้วยแรงดันในเครื่องทดสอบ (Resin flow)

แผ่นทองแดง (Copper foil) เป็นวัตถุดิบหลักสำคัญในการผลิตแผ่นลามิเนต เนื่องจากเป็นตัวที่ทำให้เกิดลายวงจรในการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ คุณสมบัติที่คาดว่าจะทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงคือ

ความขรุขระของผิวหน้าแผ่นทองแดง (Roughness: Rz) ในการผลิตแผ่นลามิเนตมีการให้ความร้อนและให้ความดันขณะทำลามิเนชัน เมื่อแผ่นพรีเพรกได้รับความร้อนเรซิ่นที่เกาะอยู่บนไฟเบอร์กลาสก็จะเริ่มหลอมเหลวและเกิดการไหลตัวขึ้น หากผิวของแผ่นทองแดงมีความขรุขระมากอาจไปปิดกั้นการไหลของเรซิ่น ทำให้เรซิ่นไหลตัวได้ไม่ดีเมื่อเรซิ่นเริ่มแข็งตัวจึงทำให้แผ่นทองแดงเสียรูปไปด้วยได้จึงทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงขึ้น

ความหนาของแผ่นทองแดง (Thickness) จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อผลิตแผ่นลามิเนตด้วยแผ่นทองแดงที่ความหนา 18 μm มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการผลิตแผ่นลามิเนตด้วยแผ่นทองแดงที่ความหนาอื่น ๆ

ผู้ผลิตแผ่นทองแดง (Supplier) จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าแผ่นทองแดงจากผู้ผลิต MC และ OM มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงที่ต่ำมากถึงประมาณ 2 – 3 เท่าของแผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY, CC และ LT ดังนั้นผู้ผลิตแผ่นทองแดงจึงเป็นสาเหตุอีกประการหนึ่งของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง

เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดง (Percentage of elongation) การยืดตัวของแผ่นทองแดงมีส่วนสำคัญอย่างมากในการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง หากแผ่นทองแดงมีค่าการยืดตัวมากเกินไป เมื่อได้รับความร้อนแผ่นทองแดงก็จะเกิดรอยยับได้ง่าย แต่ถ้าค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงมีค่าน้อยเกินไป แผ่นทองแดงอาจเกิดการแตกหรือร้าวได้ง่ายในขณะที่มีการอบด้วยความร้อนและอัดความดันขณะที่ทำการลามิเนชันผลิตแผ่นลามิเนต

ความหนาของแผ่นลามิเนตอาจส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เนื่องจากแผ่นลามิเนตในแต่ละความหนาใช้จำนวนแผ่นพรีเพรกเป็นองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติของแผ่นพรีเพรกในแต่ละแผ่นก็ย่อมแตกต่างกันด้วย

4.2.4 Method (กระบวนการทำงาน)

กระบวนการผลิตแผ่นลามิเนตที่อาจส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง มีดังนี้คือ

จำนวนแผ่นลามิเนตที่ทำการเพรส หากมีจำนวนมากเกินไปอาจทำให้แผ่นทองแดงที่อยู่ชั้นล่างเกิดรอยยับได้

โปรแกรมในการทำลามิเนชัน (Press program) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ควบคุมโปรแกรมและคาดว่าจะส่งผลต่อการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ได้แก่ ความดัน (Pressure) ความดันที่สุญญากาศ (Vacuum pressure) อัตราการให้ความร้อน (Heat rate) และอัตราการลดอุณหภูมิ (Cooling rate)

ค่าแรงดึง (Tension) ของเครื่องจักรที่ใช้ดึงแผ่นทองแดงออกจากม้วนไม่เหมาะสมจึงส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ทางบริษัทเคยทำการทดลองปรับค่าแรงดึงเพื่อหาค่าแรงดึงที่เหมาะสมแล้ว พบว่าค่าแรงดึงของเครื่องจักรที่ใช้ในปัจจุบันคือค่าที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเมื่อผลิตแผ่นลามิเนตแล้ว เกิดของเสียต่าง ๆ ในปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนใช้ค่าแรงดึงนี้ และปัจจุบันมีการควบคุมโดยการออกมาตรฐานการปฏิบัติงาน ว่าด้วยเรื่องการปรับค่าแรงดึงของเครื่องจักรขณะดึงม้วนแผ่นทองแดง ให้พนักงานทุกคนปฏิบัติตามข้อกำหนดนี้ด้วย

จากรูปที่ 4.8 แผนผังแสดงสาเหตุและผลของการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษารูปแบบของการปรับความดันในการทำลามิเนชัน ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดงที่อุณหภูมิ 180°C และขอบของไฟเบอร์กลาส เนื่องจากลักษณะการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง เกิดบนแผ่นทองแดงที่มีการทำลามิเนชันที่อุณหภูมิสูงประมาณ 180°C และสามารถสังเกตเห็นการเกิดรอยยับได้ในขั้นตอนการแยกแผ่นแสตนเลสออกจากแผ่นลามิเนต (Breakdown) ซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากทำการลามิเนชันเสร็จสิ้นแล้ว แผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงส่วนใหญ่เกิดตั้งแต่ขอบเข้าไปด้านในแผ่น ที่บริเวณขอบของแผ่นลามิเนตนี้คือบริเวณเดียวกับที่น้ำยาวานิชไม่สามารถซึมเข้าสู่ไฟเบอร์กลาสได้ และด้วยระยะเวลาที่ทำการศึกษามีจำกัดคือเพียง 4 เดือนเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถศึกษาสาเหตุที่คาดว่าจะทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงทั้งหมดได้ จึงเลือกศึกษาเพียง 3 ตัวแปรนี้ ซึ่งคาดว่าเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง และไม่กระทบต่อกระบวนการผลิตแผ่นลามิเนตโดยภาพรวม อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการศึกษาน้อย เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาเป็นเครื่องมือที่ทางบริษัทมีอยู่ก่อนแล้ว

4.3 ผลการทดลองหาอุณหภูมิของเรซิ่นบนไฟเบอร์กลาสที่เริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้างกัน

นำพรีเพรกไปขยำให้เรซิ่นที่เคลือบอยู่หลุดออกมา จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง DSC (Differential scanning calorimeter) หาอุณหภูมิเริ่มต้นที่เรซิ่นเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้าง (Starting cure temperature) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเริ่มต้นที่เรซิ่นเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช

สูตรน้ำยาวานิช	Starting cure temperature (°C)
063	118.3
264	112.8
072	105.0
262	113.1
162	127.7

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่เรซิ่นเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างที่แตกต่างกัน เนื่องจากน้ำยาวานิชในแต่ละสูตรมีองค์ประกอบและส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกันไปด้วย ผลจากการทดลองนี้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันต่อไป

4.4 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชัน

4.4.1 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1

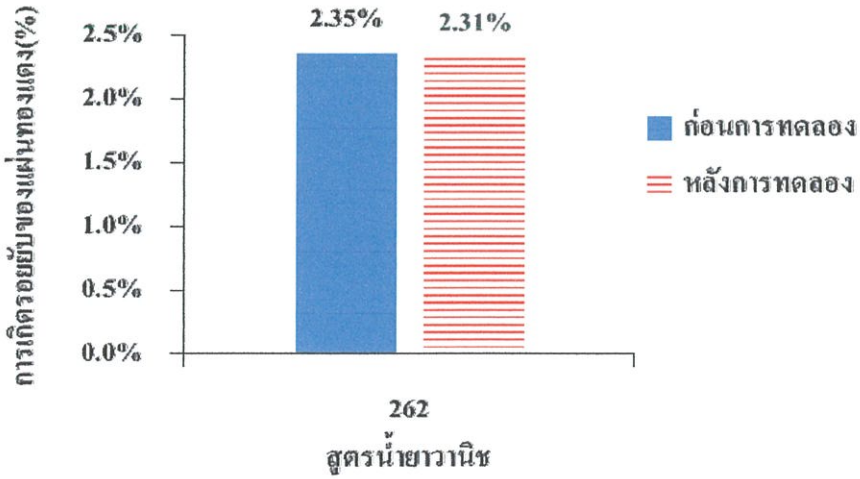
จากข้อสันนิษฐานว่า การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงอาจเกิดจากการให้ความดันเร็วเกินไปก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะอ่อนตัว และอุณหภูมิเริ่มต้นที่เรซิ่นจะเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้าง ซึ่งอาจทำให้แผ่นทองแดงมีความอ่อนตัวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเรซิ่นเกิดการไหลจึงทำให้แผ่นทองแดงอาจเคลื่อนไปพร้อมกับเรซิ่นในแนวระนาบ ขณะที่แรงดันก็กดแผ่นทองแดงไว้ด้วยจากด้านบน จึงทำให้เกิดแรงเค้น (Stress) ดันแผ่นทองแดงให้แนบสนิทไปตามร่องเส้นใยไฟเบอร์กลาส และการให้ความดันที่เร็วเกินไปยังทำให้เรซิ่นเกิดการไหลได้มากขึ้น จากเอกสารของบริษัท Shenzhen Core-Tex Composite Materials กล่าวว่า ถ้าเรซิ่นเกิดการไหลเป็นจำนวนมากจะส่งผลให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ดังนั้นจึงปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชัน โดยการเพิ่มความดันให้ถึง 250 psi ก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะอ่อนตัว ประมาณ 5 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มความดัน 30 psi ต่อนาที และเพิ่มความดันให้ถึงความดันสูงสุด 370 psi ก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะเริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้าง ประมาณ 5 นาที ด้วยอัตราการ

เพิ่มความดัน 30 psi ต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันต่ำที่สุดที่ตู้เพรสสามารถทำงานได้ เพื่อลดการไหลของเรซิ่น จากนั้นคงความดันไว้ที่ 370 psi จนกว่าอุณหภูมิแผ่นลามิเนตจะอยู่ในช่วง 180-200 °C จึงลดความดันลงเท่ากับ 100 psi แล้วทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตเมื่อใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY

ครั้งที่	ความหนาของแผ่นลามิเนต (มม.)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่เกิดเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	1.32	168	6.4	5	5.1	0
2	1.50	480	5.4	6	6.4	4

ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 2.31% ของจำนวนที่ทดลองผลิต ซึ่งการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงนี้มีค่าใกล้เคียงกับก่อนการทดลองที่ใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนตเมื่อใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 262 และใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต NY

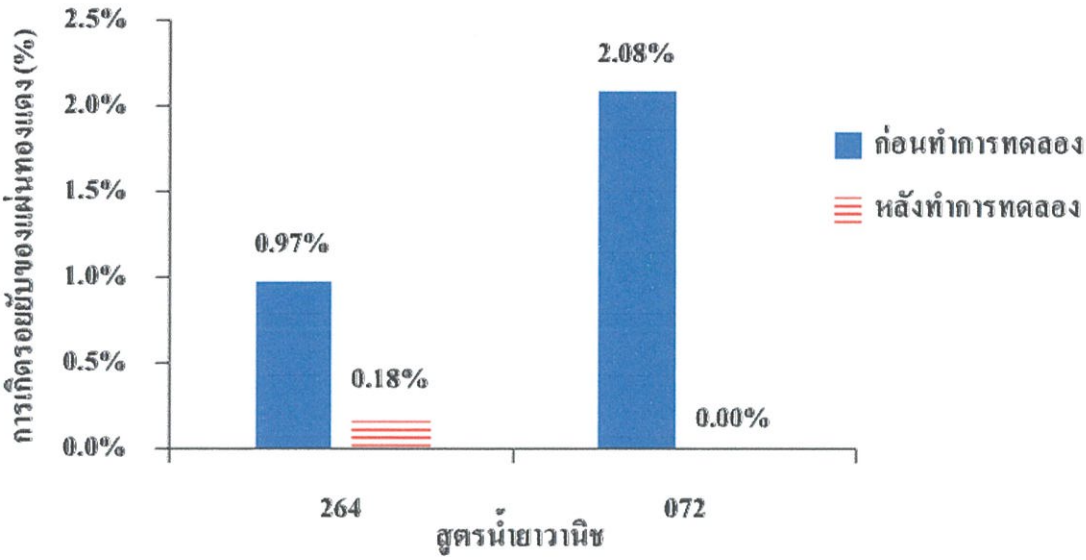
4.4.1 ปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2

จากผลการผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 1 คาดว่าการปรับค่าความดันก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะอ่อนตัว และก่อนถึงอุณหภูมิที่เรซิ่นจะเริ่มต้นเชื่อมโยงโครงสร้าง เพียงเท่านั้นอาจไม่ใช่สาเหตุของการเกิดแผ่นทองแดงยับ เนื่องจากขณะลดอุณหภูมิลงเรซิ่นบางส่วนยังสามารถเกิดการเชื่อมโยงโครงสร้างได้เพิ่มเติม แต่กลับลดความดันลงอย่างรวดเร็ว อาจทำให้เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วของแผ่นทองแดงแล้วเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงได้ ดังนั้นจึงปรับรูปแบบการให้ความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2 โดยแก้ไขจากรูปแบบที่ 1 คือให้คงความดันไว้ที่ความดันสูงสุด 370 psi จนจบการทำลามิเนชัน ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยรูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2

ครั้งที่	สูตรน้ำยาวานิช	ความหนาแผ่นลามิเนต (มม.)	ผู้ผลิตแผ่นทองแดง	จำนวนแผ่นลามิเนตที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	264	1.50	LT	168	17.6	1	23.2	0
2	264	1.57	LT	192	23.5	0	23.5	0
3	264	1.57	LT	192	20.1	0	20.8	0
4	072	2.10	CC	96	10.2	0	6.9	0

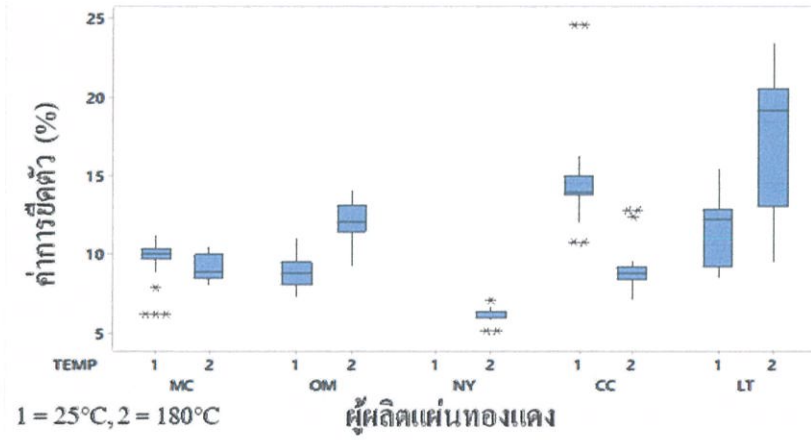
ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยรูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2 โดยใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 และ 072 ตามลำดับ พบว่าเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง 0.18% ของจำนวนที่ทดลองผลิต และไม่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตแผ่นลามิเนตของทางบริษัทตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 จะเห็นว่ารอยยับของแผ่นทองแดงที่เกิดขึ้นนั้นลดลง 0.79% และ 2.08% จากก่อนการทดลองที่ใช้รูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบเดิมที่บริษัทใช้ ดังนั้นรูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันแบบที่ 2 จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการผลิตแผ่นลามิเนตครั้งต่อไป เพื่อลดการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดง



รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละสูตรน้ำยาวานิช เมื่อผลิตแผ่นลามิเนตด้วยรูปแบบการปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2

4.5 เลือกเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดง

จากการรวบรวมข้อมูลเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Elongation) ของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิต ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนภูมิกล่องเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิต

จากเอกสารของบริษัท Shenzhen Core-Tex Composite Materials กล่าวว่า “แผ่นทองแดงที่มีความบางมาก ๆ (18 μm หรือต่ำกว่า) ควรใช้แบบ HTE เพราะมีค่าความเหนียว (Ductility) ที่อุณหภูมิสูงระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถลดการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงได้”

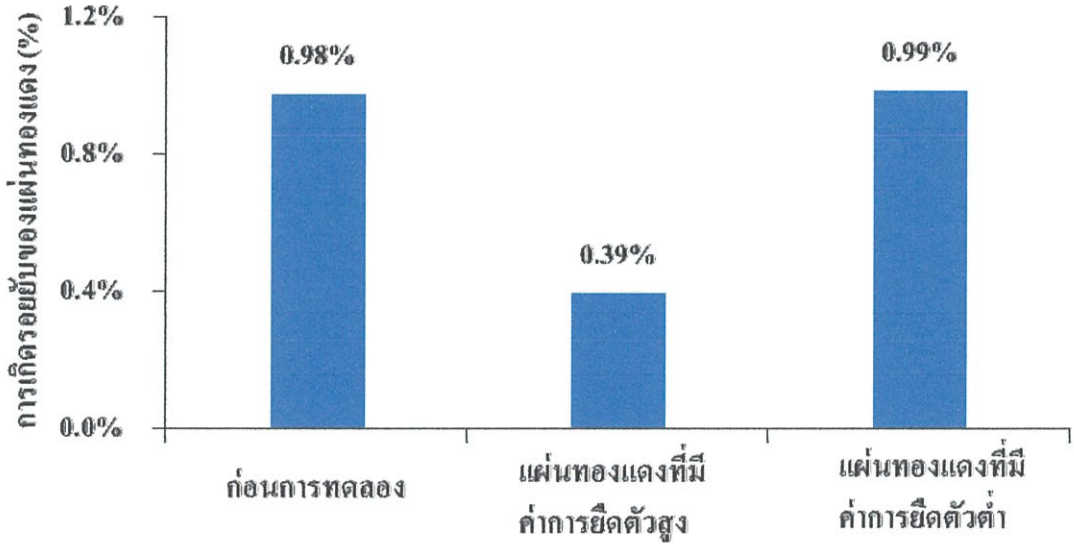
จากการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิตที่ทางบริษัทใช้ในการผลิตแผ่นลามิเนต พบว่า บริษัทใช้แผ่นทองแดงชนิด HTE ทั้งหมด และเนื่องจากบริษัทไม่มีอุปกรณ์ในการวัดค่าความเหนียวของวัสดุ จึงอ้างอิงค่าจากบริษัทผู้ผลิตแผ่นทองแดง ซึ่งระบุเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.12

ผู้วิจัยจึงสนใจเลือกแผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่อุณหภูมิ 180°C สูงสุด และต่ำสุดในล็อต XXX มาทดลองผลิตแผ่นลามิเนต เพื่อดูแนวโน้มว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของแผ่นทองแดงที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดในล็อตส่งผลต่อการเกิดแผ่นทองแดงยับอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้แผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนตต่อไป ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. แสดงดังตารางที่ 4.5 ในการทดลองครั้งนี้ใช้โปรแกรมเดิมของทางบริษัทในการทำลามิเนชัน โดยครึ่งหนึ่งของการผลิตแผ่นลามิเนตใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดทั้งแผ่นทองแดงด้านบนและด้านล่าง ส่วนอีกครึ่งหนึ่งใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำสุดทั้งด้านบนและด้านล่าง แผ่นทองแดงที่ใช้ในการทดลองมาจากผู้ผลิต CC ทั้งหมด

ตารางที่ 4.5 ผลการผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. เมื่อทำการเลือกค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดง

ครั้งที่	สูตรน้ำยาวานิช	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	162	84	10.4	1	10.2	0
		84	6.9	0	6.9	0
2	162	83	10.4	1	10.2	0
		83	6.9	1	6.9	0
3	162	84	10.4	0	10.2	0
		84	6.9	2	6.9	0
4	264	128	10.1	0	10.1	0
		128	6.1	2	6.9	0
5	264	128	10.1	0	10.1	0
		128	6.1	0	6.9	0

ในการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง (10.1 – 10.4) ที่อุณหภูมิ 180°C ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 162 และ 264 เกิดรอยยับต่ำกว่าแผ่นลามิเนตที่ใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำ (6.1 – 6.9) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ก่อนการทดลองพบว่า ในการผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 162 และ 264 โดยใช้แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC ตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงสิงหาคม พ.ศ. 2560 ของทางบริษัท เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงเฉลี่ย 0.98% จากจำนวนการผลิตทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะเห็นว่ามีการเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงลดลง 0.59% เมื่อใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง และมีค่าใกล้เคียงกับการผลิตแผ่นลามิเนตเมื่อใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวต่ำ



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในผลิตแผ่นลามิเนตโดยเลือกค่าการยืดตัว

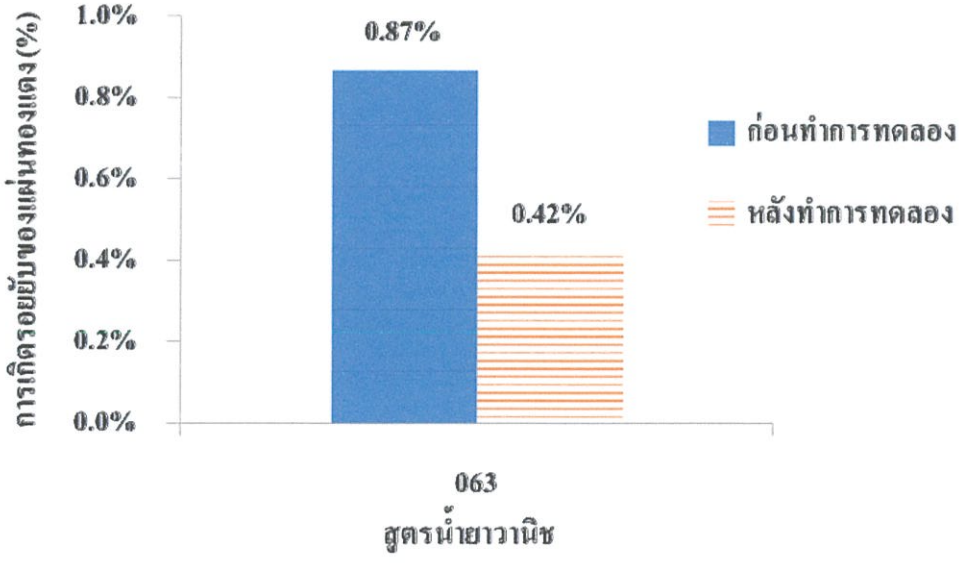
4.6 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้การปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 และเลือกใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่อุณหภูมิ 180°C

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 และในการเลือกแผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่อุณหภูมิ 180°C มีเปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงต่ำ ดังนั้นจึงทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตด้วยการปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 และใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงที่อุณหภูมิ 180°C แสดงผลการทดลองดังนี้

การทดลองครั้งที่ 1 ผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. และใช้สูตรน้ำยาวานิช 063 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. และใช้สูตรน้ำยาวานิช 063

ครั้งที่	ผู้ผลิตแผ่นทองแดง	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	CC	84	8	0	9.6	1
2	CC	84	8	0	9.6	0
3	CC	512	9.6	3	9.6	0
4	LT	512	23	1	19.3	0

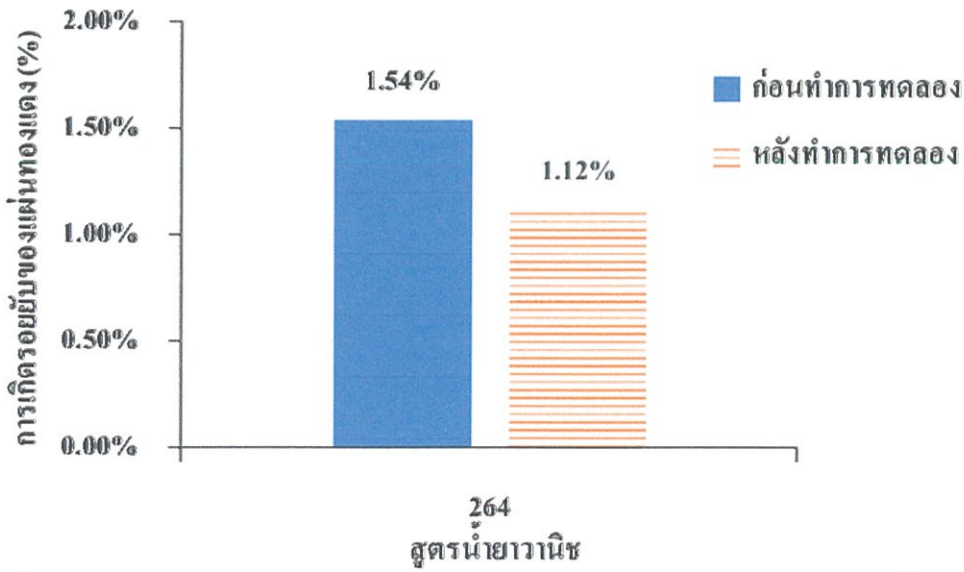


รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 1

การทดลองครั้งที่ 2 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 264 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 264

ครั้งที่	ความหนาแผ่นลามิเนต (มม.)	ผู้ผลิตแผ่นทองแดง	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	1.50	LT	512	23.5	1	19.3	0
2	1.50	LT	264	12.7	2	20.5	2
3	1.50	LT	264	12.7	1	20.5	1
4	1.57	CC	192	10	1	10	0
5	1.57	CC	144	10.1	4	10.1	0
6	1.57	CC	144	10.1	5	10.1	0

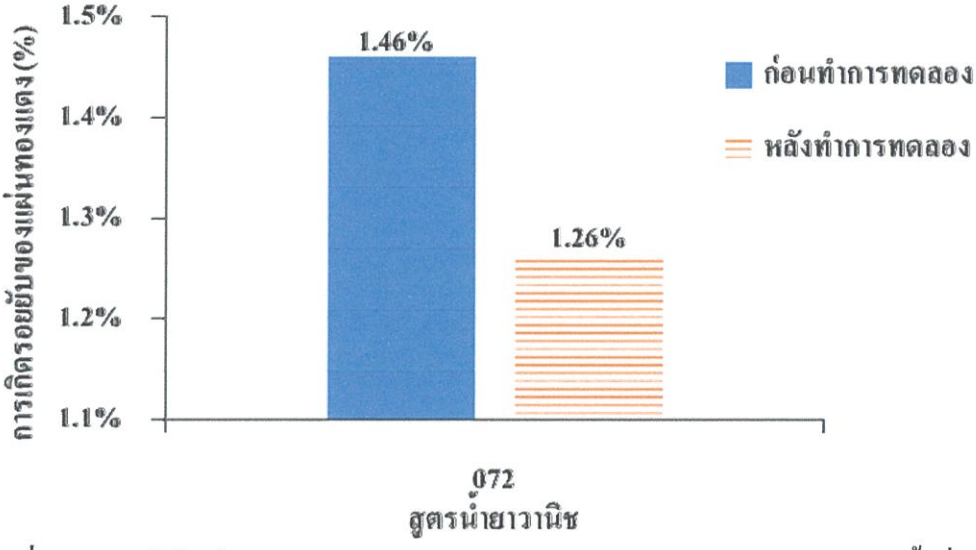


รูปที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 3 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 072 และแผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองครั้งที่ 3 ผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 072 แผ่นทองแดงจากผู้ผลิต CC

ครั้งที่	ความหนาแผ่นลามิเนต (มม.)	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	1.20	168	10.1	0	10.1	0
2	1.50	156	9.6	2	8	0
3	1.57	156	10	0	10	0
4	1.57	156	10.1	6	10.1	0

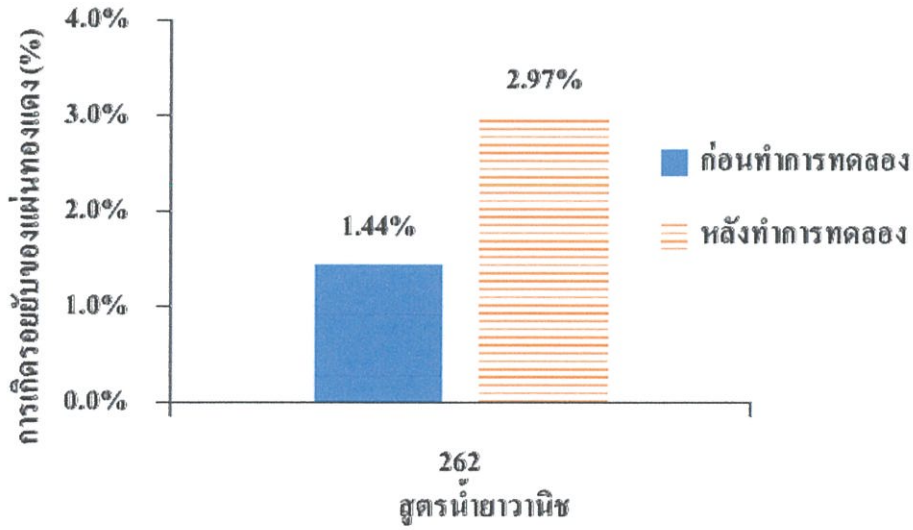


รูปที่ 4.16 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 3

การทดลองครั้งที่ 4 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 262 ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองครั้งที่ 4 ผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้สูตรน้ำยาวานิช 262

ครั้งที่	ความหนาแผ่นลามิเนต (มม.)	ผู้ผลิตแผ่นทองแดง	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	1.24	CC	51	8	1	9.6	0
2	1.32	CC	144	8	1	9.6	0
3	1.32	CC	168	8	3	6.1	0
4	1.50	CC	156	10.2	7	6.9	0
5	1.60	LT	144	14.8	8	18.4	0
6	1.60	LT	144	20.5	4	18.4	0



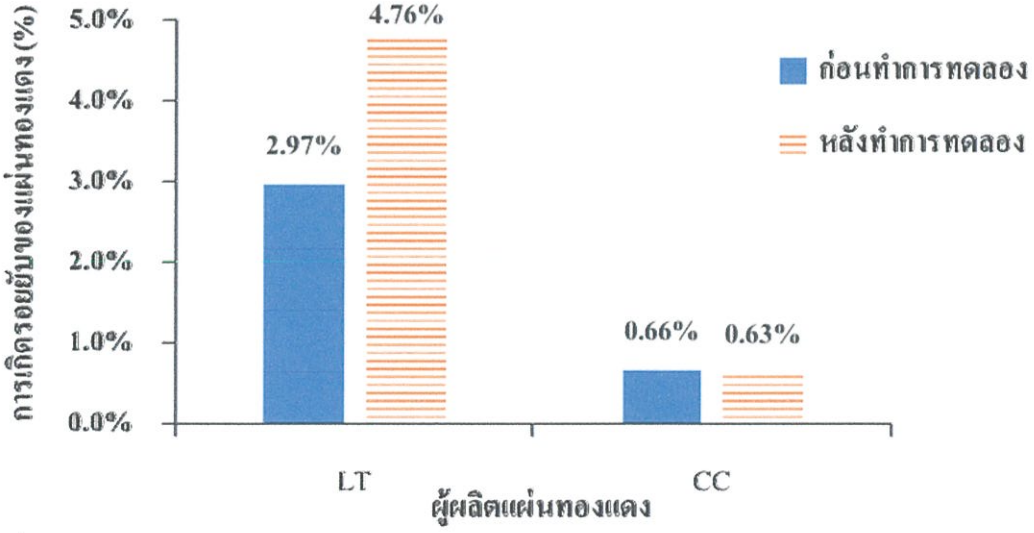
รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงก่อนและหลังทำการทดลองครั้งที่ 4

4.7 ทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ

เนื่องจากการเกิดแผ่นทองแดงยับมักเริ่มเกิดจากบริเวณขอบของแผ่นลามิเนต ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำยาวานิชไม่สามารถซึมเข้าสู่เส้นใยไฟเบอร์กลาสได้ จึงทดลองตัดขอบไฟเบอร์กลาสจากนั้นนำไปผลิตเป็นพรีเพรกเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นลามิเนต ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตที่ความหนา 1.50 มม. ด้วยสูตรน้ำยาวานิช 264 โดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ

ครั้งที่	ผู้ผลิตแผ่นทองแดง	จำนวนแผ่นลามิเนต ที่ผลิต (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านบน (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)	ค่าการยืดตัวของแผ่นทองแดงด้านล่าง (%)	จำนวนแผ่นลามิเนตที่เกิดรอยยับของแผ่นทองแดง (แผ่น)
1	LT	84	16.1	4	17	0
2	CC	160	6.9	1	6.9	0



รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในแต่ละผู้ผลิต เมื่อทำการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตโดยใช้พรีเพรกจากไฟเบอร์กลาสที่ไม่มีขอบ

บทที่ 5
สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การเกิดรอยยับของแผ่นทองแดงในการผลิตแผ่นลามิเนต เกิดจากรูปแบบของการปรับความดันในการทำลามิเนชันไม่เหมาะสม คือมีการให้ความดันเร็วเกินไปทำให้เรซิ่นเกิดการไหลเป็นจำนวนมาก และขณะลดอุณหภูมิก็ลดความดันลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็วของแผ่นทองแดง การใช้แผ่นทองแดงที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่อุณหภูมิ 180 ^{o}C ไม่เหมาะสม และชนิดของน้ำยาวานิชก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรอยยับของแผ่นทองแดงขึ้น การปรับความดันในการทำลามิเนชันรูปแบบที่ 2 เหมาะสำหรับการผลิตแผ่นลามิเนตด้วยสูตรน้ำยาวานิช 063, 264 และ 072 และแผ่นทองแดงจากผู้ผลิต LT และ CC ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18 - 24 และ 8 - 11 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากระยะเวลาในการทำสหกิจศกษามีจำกัด ทำให้จำนวนการทดลองผลิตแผ่นลามิเนตมีน้อย เพื่อให้ผลการทดลองแม่นยำและใช้ได้จริงมากยิ่งขึ้นควรทำการทดลองเพิ่มเติม

5.2.2 ในการปรับโปรแกรมการทำลามิเนชันอาจทำการปรับให้เหมาะสมกับแผ่นทองแดงที่มาจากผู้ผลิตแต่ละบริษัทและความหนาของแผ่นลามิเนตที่ต้องการผลิตด้วย

บรรณานุกรม

บริษัท ไทยลามิเนตแมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. 2551. **หลักการควบคุมคุณภาพ: Principal of Quality Control.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และดร.ชาคริต สิริสิงห. 2544. **พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้.** กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ฤดี มาสุจันท์. 2555. **การควบคุมคุณภาพ.** พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.

Clyde F. Coombs, JR. 2008. **Printed circuits handbook.** 6th ed. New York : McGraw-Hill.

Joseph D. Menczel and R. Bruce Prime. 2009. **Thermal analysis of polymer: fundamentals and application.** New Jersey : John Wiley.

R. S. Khandpur. 2006. **Printed circuits boards-design, fabrication, and assembly.** New York : McGraw-Hill.

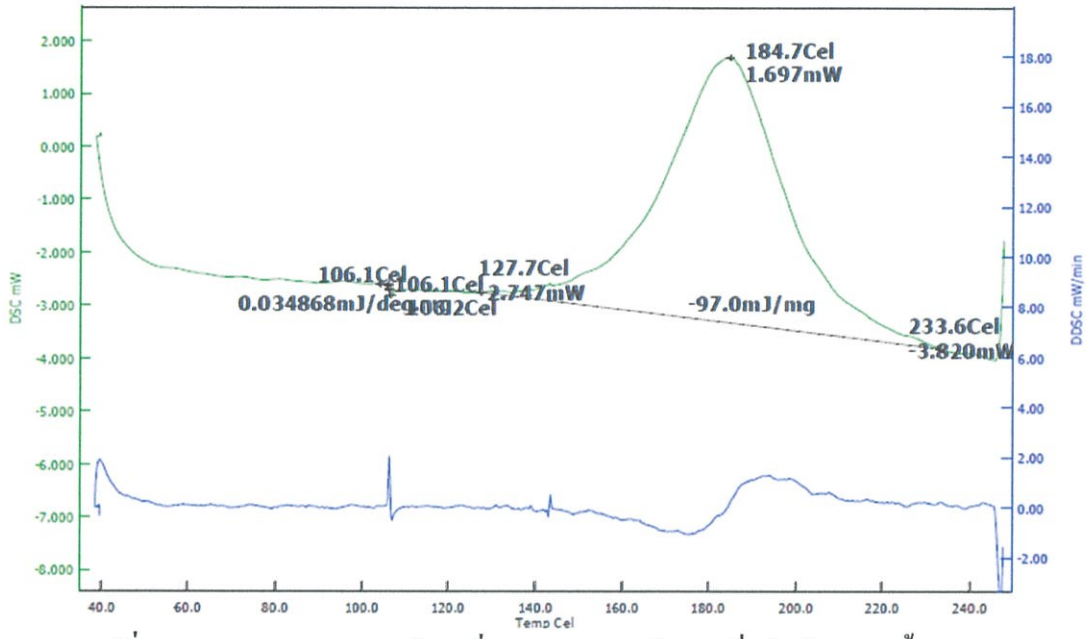
William D. Callister, Jr. 2548. **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน-Materials Science and Engineering.** แปลโดย สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ. กรุงเทพฯ : ท้อป.

ภาคผนวก

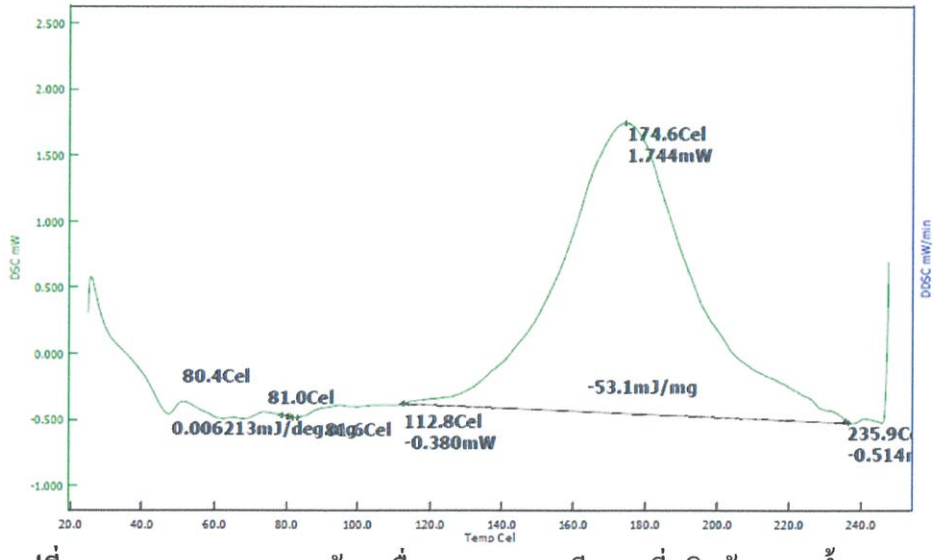
ภาคผนวก

ข้อมูลดิบ

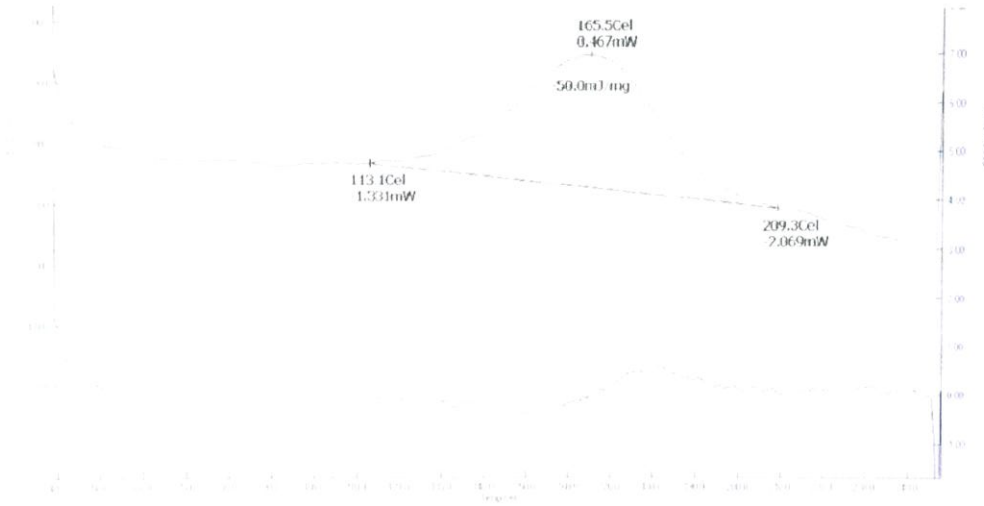
ภาคผนวกแสดงข้อมูลดิบที่ได้จากการใช้ DSC



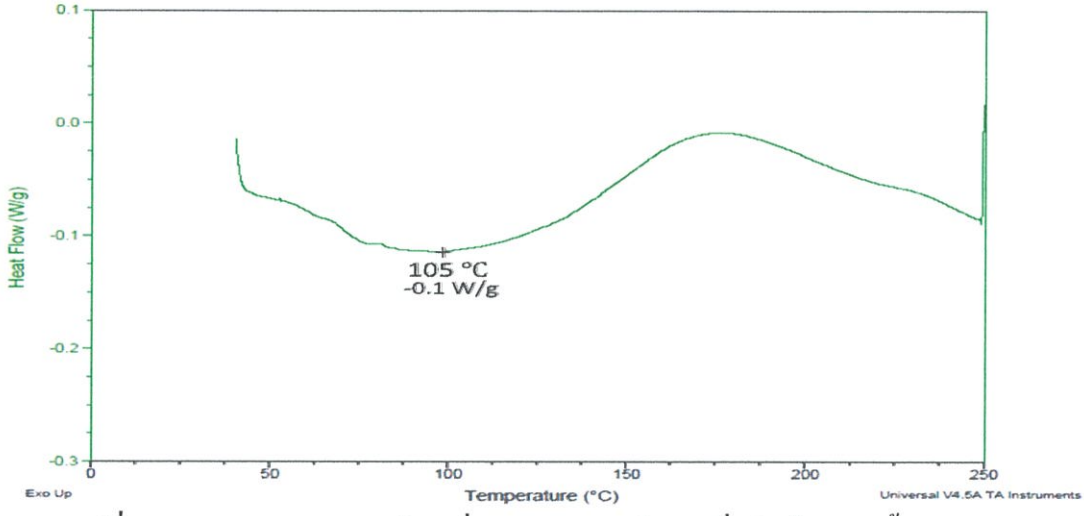
รูปที่ ก.1 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของพรีเพรกที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยา 162



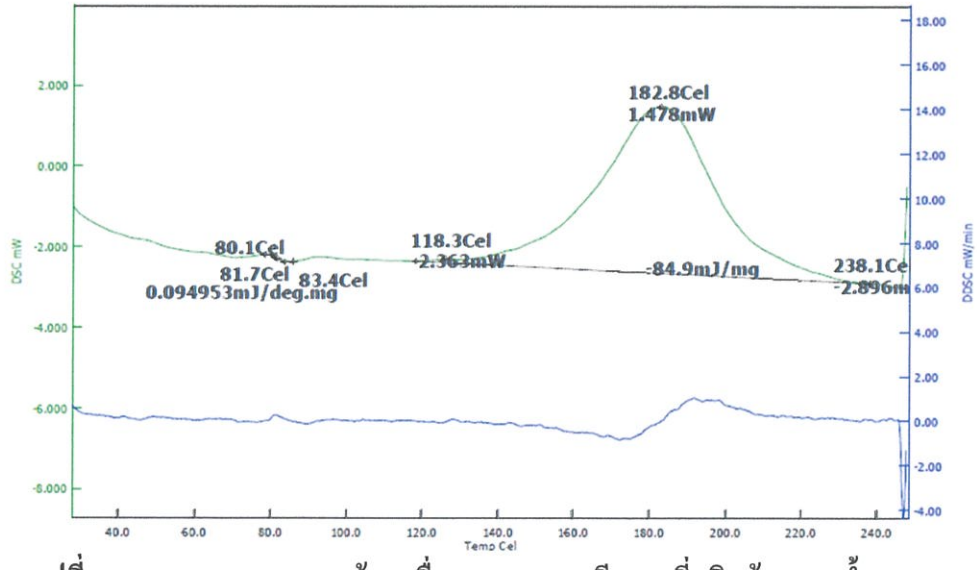
รูปที่ ก.2 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของพรีเพรกที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยา 264



รูปที่ ก.3 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของพรีเพรกที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยา 262



รูปที่ ก.4 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของพรีเพรกที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยา 072



รูปที่ ก.5 ผลจากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC ของพรีเพรกที่ผลิตด้วยสูตรน้ำยา 063

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวณัฐธิดา เที่ยงตรง

วัน เดือน ปีเกิด 17 มกราคม 2539

ที่อยู่ 192 หมู่ที่ 16 ตำบล ดงมะดะ อำเภอ แม่ลาว จังหวัด เชียงราย 57250

E-mail nutthida0452@gmail.com

โทรศัพท์ 088-2285288

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2551 - 2553 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนดำรงราษฎร์สงเคราะห์ เชียงราย
- พ.ศ. 2554 - 2556 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสามัคคีวิทยาคม เชียงราย
- พ.ศ. 2557 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
  คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนก Technical Transfer
  บริษัท จอห์นสัน แอนด์ จอห์นสัน (ประเทศไทย) จากัด
  ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2560 ถึงวันที่ 27 กรกฎาคม 2560
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา แผนกวิศวกรรมกระบวนการผลิต
  บริษัท ไทยลามิเนตแมนูแฟคเจอเรอร์ จำกัด
  ตั้งแต่วันที่ 7 สิงหาคม 2560 ถึงวันที่ 24 พฤศจิกายน 2560