# บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนความหนาแน่นต่ำชนิดแข็งจากโทลูอีนไดไอโซ-ไซยาเนต และพอลิออลชนิดต่าง ๆ ที่จัดหาจากภายในประเทศ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของพอลิออลตลอดจนองค์ประกอบที่สำคัญชนิดอื่น ๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้ เช่น ความหนาแน่น ลักษณะโครงสร้างของเซลล์โฟม ขนาด ความละเอียดและความสม่ำเสมอของเซลล์ ตลอดจนสมบัติเชิงกลต่าง ๆ เพื่อหาสูตรและภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งเพื่อใช้เป็นโครงสร้างของกระดานโต้คลื่น

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) องค์ประกอบหลักของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนสำหรับทำกระดานโต้คลื่นที่นำเข้าจากต่างประเทศในส่วนของไอโซไซยาเนตน่าจะเป็นโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตพรีพอลิเมอร์ และส่วนของสารประกอบพอลิออลเป็นการผสมกันระหว่างพอลิอีเทอร์พอลิออลและ/หรือพอลิเอสเทอร์พอลิออลที่ใช้สำหรับเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น และชนิดแข็ง

2) จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของสารตั้งต้นที่นำเข้าจากต่างประเทศทำให้ทราบข้อมูลที่มีความสำคัญ เช่น ผลจาก FT-IR, TGA, GPC, ค่าไฮดรอกซิล (OHV) หรือค่า NCO content ซึ่งสามารถนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไปเทียบเคียงหาสารตั้งต้นจากภายในประเทศที่มีสมบัติใกล้เคียงมาทำการออกสูตรโฟมพอลิยูรีเทนสำหรับทำกระดานโต้คลื่นได้

3) โฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ผู้ประกอบการใช้อยู่ในปัจจุบันซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ พบว่ามีเซลล์โฟมที่ละเอียดและสม่ำเสมอ (uniformity) ชิ้นงานมีสีขาว (ขาวฟ้า) และมีความหนาแน่นที่ต่ำ (free rise density ประมาณ 31-34 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ในขณะที่โฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากสารตั้งต้นภายในประเทศโดยใช้สูตรที่เหมาะสมจากการทดลอง พบว่าชิ้นงานมีสีขาวนวล (ขาวเหลือง) เซลล์โฟมมีความสม่ำเสมอแต่มีขนาดที่ใหญ่กว่าโฟมพอลิยูรีเทนต้นแบบเล็กน้อย และมีความหนาแน่นที่ต่ำเช่นกัน (free rise density ประมาณ 32-35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

4) ความเร็ว (speed) ในการปั่น และระยะเวลาที่ใช้ในการปั่นมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของเซลล์ โฟมที่เตรียมได้กล่าวคือ ถ้าการปั่นผสมสารตั้งต้นที่ไม่เข้ากัน หรือเข้ากันได้ไม่สมบูรณ์จะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูพรุน ขนาดเซลล์ใหญ่ และไม่สม่ำเสมอ

5) อุณหภูมิของสารตั้งต้นมีผลกับเวลาการเกิดปฏิกิริยาของโฟม กล่าวคือถ้าสารตั้งต้นยิ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาของโฟมยิ่งช้าลง และจะส่งผลให้สารตั้งต้นมีความหนืดสูง ใช้งานยาก

6) จากการแปรผันปริมาณสารฟู (น้ำกลั่น) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในโฟมพอลิยูรีเทน พบว่า

- กรณีปล่อยให้โฟมฟูตัวอย่างอิสระ (ในแม่แบบเปิด) ถ้าปริมาณของน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมพอลิยูรีเทนลดลง ซึ่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงาน เช่น ความต้านทานแรงกด ความต้านทานแรงดัดโค้ง และความแข็งลดลง
- กรณีที่ปล่อยให้โฟมฟูตัวในแม่แบบปิดโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน (เท่ากัน) พบว่าเมื่อปริมาณของน้ำกลั่นเพิ่มมากขึ้น แต่จะทำให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น

7) สามารถเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งสำหรับทำกระดานโต้คลื่นจากสารตั้งต้นภายในประเทศที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยสูตรและภาวะการเตรียมที่ใช้มีดังนี้

<u>องค์ประกอบที่ใช้</u>

พอลิออล (polyols)

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| - ReA 8770, trade name (polyester polyol) | = | 3.0 | pbw | 100 pbw |
| - RP 3003, trade name (polyether polyol) | = | 7.0 | pbw | |
| - RP4260, trade name (polyether polyol) | = | 55.0 | pbw | |
| - RP 4010, trade name (polyether polyol) | = | 35.0 | pbw | |

สารเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

| | | | |
|---|---|---|---|
| - 33-LV (trade name) | = | 0.3 | pbw |

สารฟู (blowing agent)

| | | | |
|---|---|---|---|
| - น้ำกลั่น (distilled water) | = | 5.5 | pbw |

สารลดแรงตึงผิว (surfactant)

| | | | |
|---|---|---|---|
| - B 8444 (trade name) | = | 3.0 | pbw |

สารสี (pigment)

- ไททาเนียมไดออกไซด์ ($TiO_2$) = 2.0 pbw

ไอโซไซยาเนต (isocyanate)

- BX 9201, trade name (TDI prepolymer) = 234.3 pbw (ตามการคำนวณ)

**ภาวะที่ใช้**

- อัตราเร็วในการปั่นผสม = 2,000-3,000 รอบต่อนาที
- เวลาในการปั่นผสม = 25-30 วินาที
- อุณหภูมิสารตั้งต้น = 6-8 องศาเซลเซียส

**ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยาและความหนาแน่นของโฟมที่ได้**

- cream time (ct) = 40-50 วินาที
- gel time (gt) = 140-150 วินาที
- tack free time (tft) = 240-250 วินาที
- ความหนาแน่น (free rise density) = 32-35 ก.ก./ลบ.ม.

8) สมบัติของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมขึ้นในระดับปฏิบัติการจริง (ขึ้นรูปที่โรงงานประกอบการ) จากสูตรที่เหมาะสม (ข้อ 7) เปรียบเทียบกับโฟมผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่นสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 5.1** สมบัติทางกายภาพและเชิงกลบางประการของโฟมพอลิยูรีเทนที่เตรียมขึ้นในระดับปฏิบัติการจริงจากสูตรที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับโฟมผลิตภัณฑ์กระดานโต้คลื่น

| คุณสมบัติ | | หน่วย | โฟมผลิตภัณฑ์ | โฟมพอลิยูรีเทนจากสูตรที่เหมาะสม |
|---|---|---|---|---|
| สมบัติทางกายภาพ | สี (Color) | - | ขาวฟ้า | ขาวเหลือง |
| | ความหนาแน่น (Core density) | $kg/m^3$ | 40-45 | 43-47 |
| | ขนาดเซลล์โฟม (Cell size) | μm | 200-300 | 250-350 |
| สมบัติเชิงกล | ความต้านทานแรงกด (Compressive strength) | MPa | 0.16 | 0.33 |
| | ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural strength) | MPa | 0.72 | 0.82 |
| | ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย (ความแข็ง) (Indentation hardness) | newton | 68.50 | 66.33 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**5.2 ข้อเสนอแนะ**

1) ในงานวิจัยสูตรที่ใช้ในการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งอาจไม่ใช่สูตรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นโครงสร้างหลักของกระดานโต้คลื่น ดังนั้นอาจมีการปรับปรุงสูตรและภาวะที่ใช้ในการเตรียมโฟม เช่น ปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของพอลิออล สารเร่งปฏิกิริยา สารฟู สารลดแรงตึงผิว และสารฟู หรือปรับเวลาและความเร็วรอบในการปั่นผสม เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล รวมถึงระยะเวลาของปฏิกิริยาการเกิดโฟมที่ใกล้เคียงกับกับโฟมต้นแบบมากขึ้น

2) ขอความอนุเคราะห์บริษัทผู้ผลิตโทลูอีนไดไอโซไซยาเนตพรีพอลิเมอร์ (BX 9201) ให้มีการผลิตขึ้นใหม่เพื่อทดแทนของเดิมที่ใกล้เสื่อมสภาพ (มีสีเหลืองเข้ม) เพราะหากได้สารตั้งต้นที่มีสีขาวจะส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีสีขาวขึ้นซึ่งตรงตามความต้องการของผู้ประกอบการและลูกค้า

3) หากมีการใช้งานจริงควรมีการเติมสารเติมแต่ง (additive) บางอย่างเพิ่มเติมในสูตรองค์ประกอบ เช่น ใส่สารป้องกันการออกซิเดชัน (anti-oxidant) เพื่อป้องกันการเกิดออกซิไดซ์จากความร้อน หรืออากาศ นอกจากนี้ อาจเติมสารยูวีสเตบิไลเซอร์ (UV stabilizers หรือ light protection agents) เพื่อป้องกันการเปลี่ยนสีเป็นสีเข้มขึ้นเมื่อโดนแสงแดด และยืดอายุการใช้งาน

4) ในกระบวนการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนสำหรับกระดานโต้คลื่นในปัจจุบันที่โรงงานผู้ผลิตอาจพัฒนาจากกระบวนการแบบกะ (batch process) มาเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (continuous process) ที่ทำการฉีดสารตั้งต้นเข้าหากันและทำให้เกิดการผสมกันโดยใช้แรงดัน (pressure) และฉีดลงในแม่แบบ เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต (productivity) ให้มีประสิทธิภาพ และรวดเร็วยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย