



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (2)

: ผลของโครงสร้างมหภาคต่อความแข็งของฟองยางธรรมชาติ”

Research and Development of Natural Rubber Latex and Products- PSU small project group (2)

: Effect of Macrostructure on Hardness of Natural Rubber Foam.

โดย

ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย และคณะ

31 พฤษภาคม 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา”

โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (2)

: ผลของโครงสร้างมหภาคต่อความแข็งของฟองยางธรรมชาติ”

Research and Development of Natural Rubber Latex and Products- PSU small project group (2)

: Effect of Macrostructure on Hardness of Natural Rubber Foam.

| คณะผู้วิจัย              | สังกัด                                                                                                 |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย | ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี |
| 2. ประยูร ศรีขวัญ        | ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี |
| 3. ยุสรี เมดา            | ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี |
| 4. กิตติศักดิ์ ทิสรอด    | ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี<br>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเป็นด้วยเสมอไป)

## บทสรุปของผู้บริหาร

### Executive Summary

คุณสมบัติในการรับแรงของฟองยางธรรมชาติจะถูกควบคุมจากความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติซึ่งฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูง จะมีความแข็งแรงสูง อย่างไรก็ตาม ฟองยางธรรมชาติดังกล่าวยังสามารถที่จะนำมาดัดแปลงโดยการเจาะรูขนาด และความถี่ต่าง ๆ กัน หรือ นำมาซ้อนชั้นด้วยความแข็งและความหนาต่าง ๆ กันได้ เพื่อดัดแปลงคุณสมบัติการรับแรงโดยรวมของผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยถึงการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติการรับแรงของฟองยางโดยการ ดัดแปลงโครงสร้างทางมหภาค คือ การซ้อนชั้นโดยการนำฟองยางที่มีความหนา และความแข็งแตกต่างกัน มาซ้อนทับกัน และการดัดแปลงด้วยการเจาะรูบนฟองยางด้วยขนาดของรู และความถี่ของรูต่างกัน โดยศึกษาผลของการดัดแปลงเหล่านี้ต่อความแข็ง และค่า sag factor ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงระดับความสบายสำหรับฟองยางที่ใช้ในงานเบาะรองรับ

การศึกษาพบว่า การนำฟองยางมาซ้อนชั้นกันสองชั้นทำให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งและค่า sag factor ของฟองยางที่ซ้อนชั้น อยู่ในระหว่างคุณสมบัติของยางตั้งต้นที่นำมาซ้อนทับกัน โดยมีอัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างชั้นเป็นตัวแปรที่ควบคุมผลของความแข็ง และ sag factor ของฟองยางซ้อนชั้นที่ได้

เมื่อทำการซ้อนสามชั้นพบว่าในขณะที่ความแข็งของฟองยางซ้อนชั้นอยู่ระหว่างความแข็งของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้นกันดังที่พบในฟองยางซ้อนสองชั้น ค่า sag factor ของยางที่ซ้อนชั้นนั้น สามารถให้ค่าที่สูงกว่าค่า sag factor ของฟองยางตั้งต้นได้

การดัดแปลงด้วยการเจาะรูขนาดของรู และความถี่ของรูต่าง ๆ กัน พบว่า ความหนาแน่นสมมูล (bulk density) และความแข็งจะแปรตามอัตราส่วนพื้นที่รับแรง โดยความแข็ง และความหนาแน่นสมมูลจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรูใหญ่ขึ้น และระยะห่างระหว่างรูน้อยลง อัตราการเปลี่ยนแปลงของความแข็ง และความหนาแน่นจากการเจาะรูนั้นเท่ากัน

จากการวิจัยครั้งนี้พบว่า การดัดแปลงฟองยางธรรมชาติโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางมหภาคนั้นสามารถดัดแปลงคุณสมบัติทางด้านการรับแรงของฟองยางธรรมชาติได้โดยง่าย สร้างความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้าน sag factor ของฟองยางธรรมชาติ ซึ่งหมายถึงระดับความสบายที่สูงขึ้นอีกด้วย

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยถึงการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติการรับแรงของฟองยางโดยการ คัดแปลง โครงสร้างทางมหภาค คือ การซ้อนชั้นโดยการนำฟองยางที่มีความหนา และความแข็งแตกต่างกัน มาซ้อนทับกัน และการคัดแปลงด้วยการเจาะรูบนฟองยางด้วยขนาดของรู และความถี่ของรูต่างกัน โดยศึกษาผลของการคัดแปลงเหล่านี้ต่อความแข็ง และค่า sag factor ซึ่งเป็นค่าที่บอกระดับความ สบายสำหรับฟองยางที่ใช้ในงานเบาะรองรับ

การศึกษาพบว่า การนำฟองยางมาซ้อนชั้นกันสองชั้นทำให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งและค่า sag factor ของฟองยางที่ซ้อนชั้น อยู่ในระหว่างคุณสมบัติของยางตั้งต้นที่นำมาซ้อนทับกัน โดยมี อัตราส่วนความหนาระหว่างชั้นเป็นตัวแปรที่ควบคุมผลของความแข็ง และ sag factor ของฟองยาง ซ้อนชั้นที่ได้

เมื่อทำการซ้อนสามชั้นพบว่าในขณะที่ความแข็งของฟองยางซ้อนชั้นอยู่ระหว่างความแข็ง ของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้นกันดังที่พบในฟองยางซ้อนสองชั้น ค่า sag factor ของยางที่ซ้อนชั้นนั้น สามารถให้ค่าที่สูงกว่าค่า sag factor ของฟองยางตั้งต้นได้

การคัดแปลงด้วยการเจาะรูขนาดของรู และความถี่ของรูต่าง ๆ กัน พบว่า ความหนาแน่นสม มูล (bulk density) และความแข็งจะแปรตามอัตราส่วนพื้นที่รับแรง โดยความแข็ง และความหนา แน่นสมมูลจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรูใหญ่ขึ้น และระยะห่างระหว่างรูน้อยลง อัตรา การเปลี่ยนแปลงของความแข็ง และความหนาแน่นจากการเจาะรูนั้นเท่ากัน

**คำสำคัญ** ฟองน้ำ, ฟองยางธรรมชาติ, ฟองยาง, ความแข็ง, โครงสร้างมหภาค

## **Abstract**

In this research, effects of macrostructure modification of natural rubber foam by layering natural rubber foam of different thickness and hardness and varying holes diameter and distance between holes on load bearing characteristic of resulting natural rubber foam were studied. Hardness and sag factor which are measure of comfort level of natural rubber foam in cushioning application were obtained from foam with various prior mentioned macrostructure modifications.

Test sample were prepared by layering natural rubber foam of different thicknesses and hardness. Two layers foam gave resulting hardness and sag factor in between original foams. Final hardness and sag factor of layered foam was controlled by thickness ratio of foams.

Upon stacking three layers of foam, it was found that even though hardness of resulting layered foam fell in between original foam as found in two layers foam, sag factor can be improved to give a higher value than that of original foams.

Introducing holes into natural rubber foam will reduce load bearing area. The larger the diameter of holes and the closer the distance between holes the smaller the load bearing area. Bulk density and hardness of foam were reduced together at the same rate when reducing load bearing area.

**Keywords**     rubber foam, natural rubber foam, hardness, macrostructure

## สารบัญ

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| บทสรุปของผู้บริหาร.....               | i   |
| บทคัดย่อ.....                         | ii  |
| Abstract.....                         | iii |
| สารบัญ.....                           | iv  |
| สารบัญรูปภาพ.....                     | v   |
| ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....  | 1   |
| วัตถุประสงค์.....                     | 4   |
| วิธีการทดลอง.....                     | 4   |
| ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....   | 5   |
| สรุปผลการทดลอง.....                   | 32  |
| สรุปผลการดำเนินงานและผลที่ได้รับ..... | 34  |
| เอกสารอ้างอิง.....                    | 35  |
| ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ.....          | 36  |
| ภาคผนวก.....                          | 37  |

## สารบัญรูปภาพ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 1 รูปแสดงถึงฟองยางแบบมีช่องว่าง (a) ภาพตัดในแนวดิ่งของช่องว่าง (b) ช่องว่างแบบทรงกลมที่เรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยม (c) ช่องว่างแบบทรงกลมที่เรียงตัวแบบสามเหลี่ยม.....                                                                                                                            | 3  |
| รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักกคที่เปลี่ยนจากค่าเริ่มต้นและจำนวนครั้งที่กดของฟองยางความหนาแน่น 75 และ 100 kg/m <sup>3</sup> ความหนา 2 นิ้ว ที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์.....                                                                                                           | 5  |
| รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกคของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> และฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> ที่ระยะกด 25% และ 65% ความหนาต่าง ๆ.....                                                                                                                                 | 7  |
| รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Sag Factor ของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> และฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> ที่ระยะกด 25% และ 65% ความหนาต่าง ๆ.....                                                                                                                              | 8  |
| รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกคของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> 2.0 และ 3.0 นิ้ว ที่ระยะกด 25%..... | 9  |
| รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกคของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> 2.0 และ 3.0 นิ้ว ที่ระยะกด 65%..... | 10 |
| รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> 2.0 และ 3.0 นิ้ว.....         | 11 |
| รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกคของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> ที่ระยะกด 25%.....                 | 13 |
| รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกคของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m <sup>3</sup> ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m <sup>3</sup> ที่ระยะกด 65%.....                 | 13 |

[illegible]

[illegible]

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ของฟองยางความหนาแน่น $70 \text{ kg/m}^3$ โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 ต่อ $100 \text{ kg/m}^3$ หนา 1 ต่อ 1 นิ้ว ที่ระยะกด 25%.....                                                                                                                                                                       | 27 |
| รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น $70 \text{ kg/m}^3$ บนฟองยางความหนาแน่น 80 และ $100 \text{ kg/m}^3$ กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น $70 \text{ kg/m}^3$ โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 ต่อ $100 \text{ kg/m}^3$ หนา 1 ต่อ 1 นิ้ว ที่ระยะกด 65%..... | 28 |
| รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น $70 \text{ kg/m}^3$ บนฟองยางความหนาแน่น 80 และ $100 \text{ kg/m}^3$ กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น $70 \text{ kg/m}^3$ โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 ต่อ $100 \text{ kg/m}^3$ หนา 1 ต่อ 1 นิ้ว.....            | 28 |
| รูปที่ 29 แสดงร้อยละของมวล, ความหนาแน่น และความแข็ง ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาด (d) และความถี่ (Z) ของรู.....                                                                                                                                                                                                      | 31 |
| รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสมมูลของฟองยางต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะห่างของรู.....                                                                                                                                                                                                      | 31 |
| รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะห่างของรู.....                                                                                                                                                                                                                          | 32 |

สัญญาเลขที่ RDG4750017

โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (2) :

ผลของโครงสร้างมหภาคต่อความแข็งแรงของฟองยางธรรมชาติ“

รายงานฉบับสมบูรณ์

เนื้อหาการวิจัย

## 1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ฟองยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์น้ำยางที่สำคัญอีกผลิตภัณฑ์หนึ่ง นอกจากจะสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติแล้ว ภาพลักษณ์ และปัญหาต่าง ๆ ที่อาจจะพบในผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติด้านอื่น ๆ นั้นกลับไม่เป็นปัญหาในผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ ฟองยางธรรมชาติถูกมองว่าเป็นสินค้าคุณภาพสูงเมื่อเทียบกับฟองน้ำประเภทอื่น เช่น ฟองน้ำพอลิยูรีเทน และสูงกว่าฟองยางสังเคราะห์ ในการใช้งานฟองยางธรรมชาติมักจะมีผ้าหุ้มอีกอย่างน้อยหนึ่งชั้นเสมอ ปัญหาเพียงธรรมชาติจึงไม่พบในผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ อีกทั้งกระแสความนิยมในการใช้สินค้าจากธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความต้องการผลิตภัณฑ์ฟองยางจากชาตินั้นสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการศึกษาวิจัยด้านต่าง ๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติจึงมีความสำคัญที่จะพัฒนาศักยภาพของประเทศไทย ไปสู่ผู้ผลิตฟองยางจากธรรมชาติในระดับต้นของโลกได้

ในการระบุคุณสมบัติในการซื้อขายฟองยางชาตินั้น นอกจากขนาดกว้างยาวและความหนาแล้ว ความแข็งนั้นเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ใช้แยกประเภทในการจำหน่าย รวมไปถึงระดับราคาของสินค้าด้วย ความแข็งแรงของฟองยางชาตินั้น จะถูกควบคุมโดยความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการคัดแปลงทางด้านกายภาพที่เป็นระดับมหภาคนั้นยังทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงรวมของชิ้นฟองยาง นำมาซึ่งความยืดหยุ่นในการออกแบบสินค้าตามความต้องการของตลาดอีกด้วย การคัดแปลงเหล่านี้ได้แก่ ฟองยางที่มีรูลักษณะรังผึ้งขนาด และรูปร่างต่าง ๆ กัน, การเจาะรูที่ขนาด และความถี่ต่าง ๆ กัน และการนำขึ้นยางความแข็งต่าง ๆ กันมาซ้อนกันกันที่ความหนา และลำดับชั้นต่าง ๆ กัน เป็นต้น จะเห็นว่าชิ้นฟองยางที่ความแข็งพื้นฐานระดับหนึ่งจะสามารถนำมาคัดแปลงได้อย่างนับไม่ถ้วนเพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ลักษณะต่าง ๆ กันตามความเหมาะสม

ความรู้สึกนุ่มสบายซึ่งค่อนข้างจะเป็นคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามผู้ใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับ ความรู้สึกขณะสัมผัสเริ่มแรก, การให้ตัวของฟองยางทั้งชิ้น และความสามารถในการกระจายแรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณที่มีความเค้นสูง ในการคัดแปลงคุณสมบัติของการสัมผัสเริ่มแรกนั้นสามารถทำได้โดยการออกแบบให้มีฟองยางสองชั้น โดยชั้นบนมีความแข็งต่ำมากเพื่อรับ

แรงสัมผัสเริ่มแรก ในขณะที่ตัวฟองยางที่เหลือนำหน้าที่ได้รับน้ำหนักตามที่ออกแบบในการใช้งาน [Madge (1962)] ส่วนคุณสมบัติในการกระจายแรงนั้นเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของฟองยางอยู่แล้ว

Wolfe [Wolfe (1982)] ได้เสนอค่า Sag Factor (สมการที่ 1) เป็นค่าในการวัดความสบายของวัสดุรองรับ โดยเสริมว่าวัสดุที่มี Sag Factor สูงกว่า 2.8 เป็นวัสดุที่ให้ความสบายได้สูง ในขณะที่เดียวกันค่านี้อาจทำให้มีความเข้าใจผิดถ้าใช้เพียงค่าเดียว ดังนั้น ในการบอกคุณลักษณะของฟองยางจึงจำเป็นต้องบอกค่าของความแข็งที่มาตรฐานระดับหนึ่ง พร้อมทั้งค่า Sag Factor ในกรณีที่ค่าความแข็งที่มาตรฐานมีค่าเท่ากัน วัสดุที่มี Sag Factor สูงกว่าจะมีความสบายมากกว่า ในแง่มุมนี้ฟองยางธรรมชาติมีคุณสมบัติดังกล่าวดีกว่าวัสดุรองรับประเภทอื่น เช่น ฟองน้ำโพลียูรีเทน, หรือสปริง กล่าวคือ ฟองยางธรรมชาติ Sag Factor 3.0, สปริง 2.6 และ ฟองน้ำโพลียูรีเทน 2.5-3.0 บริษัท Dunlopillo [Dunlopillo] แสดงให้เห็นว่าด้วยการซ้อนชั้นของฟองยางธรรมชาติ สามารถเพิ่ม Sag Factor ได้เป็น 3.5

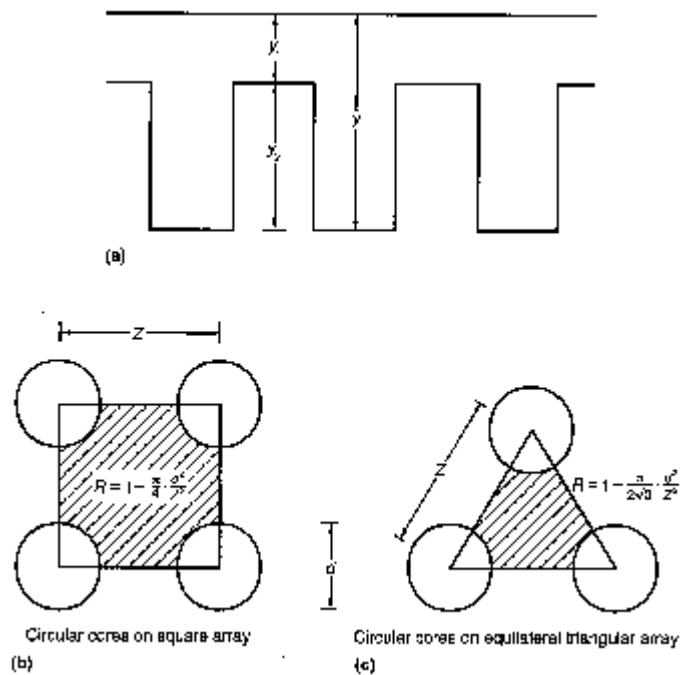
$$\text{Sag Factor} = \frac{H \text{ at } 65\% \text{ deflection}}{H \text{ at } 25\% \text{ deflection}} \quad (1)$$

ฟองยางธรรมชาตินั้นถูกผลิตให้มีช่องว่างภายในเป็นลักษณะรังผึ้งตั้งแต่ในปี 1929 [Blackley (1997), Calvert (1982), Madge (1962)] ทั้งนี้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการรับแรงต่อน้ำหนักของฟองยาง เพิ่มการถ่ายเทความร้อนและอากาศ นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องการถ่ายเทความร้อนในการผลิตอีกด้วย การออกแบบช่องว่างที่มีขนาด, รูปร่าง และความถี่ต่าง ๆ กันยังสามารถทำให้ชั้นฟองยางมีคุณสมบัติที่ต่างกันไปตามเฉพาะตำแหน่งในบริเวณเล็ก ๆ ได้อีกด้วย

การศึกษาด้านการออกแบบช่องว่างในฟองยางนั้นได้มีการศึกษาในระดับหนึ่ง [Talalay (1954), Rogers and Hecker (1958)] โดยพบว่าความแข็งของฟองยางที่มีช่องว่างมีความสัมพันธ์กับฟองยางที่ไม่มีช่องว่างดังนี้

$$H = H_0 \frac{yR}{y_1 R + y_2} \quad (2)$$

ในสมการนี้  $H$  เป็นความแข็งของฟองยางที่มีช่องว่าง ในขณะที่  $H_0$  เป็นความแข็งเริ่มต้น  $R$  คือสัดส่วนของพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างที่มีฟองยางอยู่ (ดูรูปที่ 1)  $y$  คือความหนาทั้งหมดของฟองยาง,  $y_1$  คือความหนาของฟองยางด้านบน และ  $y_2 = y - y_1$  ซึ่งก็คือความสูงของช่องว่าง



รูปที่ 1 รูปแสดงถึงฟองยางแบบมีช่องว่าง (a) ภาพตัดในแนวดิ่งของช่องว่าง (b) ช่องว่างแบบทรงกลมที่เรียงตัวเป็นสี่เหลี่ยม (c) ช่องว่างแบบทรงกลมที่เรียงตัวแบบสามเหลี่ยม

ในขณะเดียวกันน้ำหนักของฟองยางแบบมีช่องว่างก็สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 3 โดยที่  $M$  คือน้ำหนักของฟองยางต่อพื้นที่ และ  $\rho$  คือความหนาแน่นของฟองยาง

$$M = \rho(y_1 + y_2 R) \quad (3)$$

ค่า  $R$  สามารถคำนวณได้ถ้าช่องว่างดังกล่าวมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เช่น เป็นสี่เหลี่ยม หรือเป็นสามเหลี่ยม ซึ่งจะได้ค่า  $R$  เป็นไปตามสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$R = 1 - \frac{\pi d^2}{4 Z^2} \quad (4)$$

$$R = 1 - \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3} Z^2} \quad (5)$$

ในที่นี้  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่าง และ  $Z$  คือระยะระหว่างจุดศูนย์กลางของช่องว่าง

จากอนุกรมของสมการเหล่านี้ Blackley [Blackley 1997)] แสดงให้เห็นว่า ในการใช้การออกแบบเช่นนี้จะสามารถประหยัดวัตถุดิบได้มากถึง 35% โดยไม่สูญเสียคุณสมบัติอย่างอื่น

ในปัจจุบันการออกแบบของฟองยางได้เปลี่ยนไป ขนาดของช่องว่างนั้นเล็กลง ในขณะที่ความถี่เพิ่มขึ้น ความหนาของแผ่นบน ( $y_1$ ) ก็น้อยลงมาก หรือมีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้การศึกษาประเภทนี้สำหรับฟองยางที่ผลิตด้วยวิธี Dunlop นั้นยังไม่เคยมีมาก่อน ข้อมูลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมฟองยางธรรมชาติของไทย

ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่า การดัดแปลงสมบัติมหภาคเหล่านี้สามารถทำได้ง่าย แต่ให้ผลที่มีประโยชน์มากในเชิงเศรษฐกิจ และเชิงการตลาด ดังนั้นข้อมูลที่จะได้นำมาใช้เพื่อออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ตามหลักการเหล่านี้

จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลเหล่านี้สำหรับวิธีการผลิตแบบ Dunlop ซึ่งเป็นวิธีที่ผู้ผลิตในประเทศไทยทั้งหมดใช้ ยังไม่เคยมีใครศึกษา และเผยแพร่มาก่อน จึงถือว่าเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมน้ำยางของประเทศไทย

## 2. วัตถุประสงค์

- 2.1. เพื่อที่จะศึกษาถึงการเพิ่มความสบายที่วัดด้วยดัชนี Sag Factor ด้วยวิธีการซ้อนชั้นด้วยฟองยางที่มีความหนา และความแข็งต่าง ๆ กัน
- 2.2. เพื่อที่จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปด้วยการดัดแปลงด้านกายภาพด้วยการเจาะช่องว่างที่มีขนาด และความถี่ต่าง ๆ กัน

## 3. วิธีการทดลอง

### 3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1. ยางธรรมชาติจากบริษัท ปัตตานีอุตสาหกรรม (1971) จำกัด
- 3.1.2. เครื่องวัดความแข็งแบบ Indentation Hardness เครื่องประกอบด้วยแผ่นกดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และเครื่องชั่งสำหรับวัดน้ำหนักกด
- 3.1.3. เครื่องตัดขึ้นทดสอบแบบแนวตั้ง เครื่องประกอบด้วยใบมีดที่เคลื่อนที่ในแนวตั้ง ใช้เตรียมขึ้นทดสอบในด้านกว้างและยาว
- 3.1.4. เครื่องตัดขึ้นทดสอบแบบแนวนอน เครื่องประกอบด้วยใบมีดที่เคลื่อนที่ในแนวนอน ใช้เตรียมขึ้นทดสอบในด้านหนา
- 3.1.5. เบ้า และฝาเบ้าขนาดต่าง ๆ

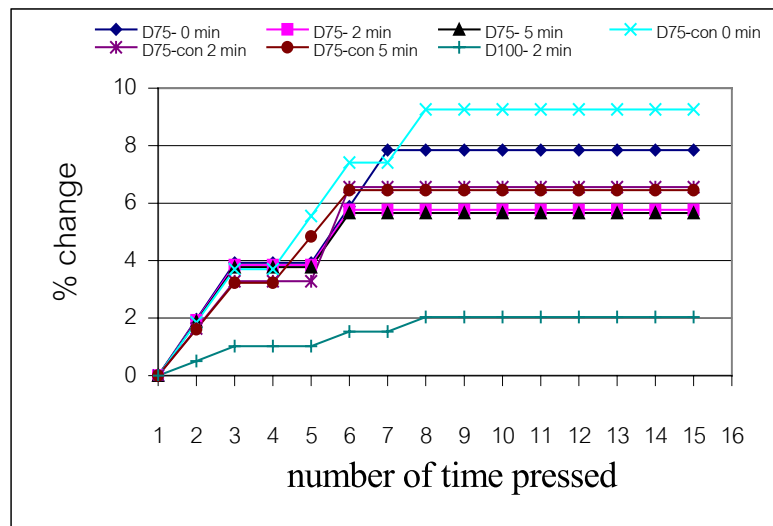
### 3.2. วิธีการทดลอง

- 3.2.1. การวัดความแข็งแบบ Indentation Hardness
  - 3.2.1.1. นำขึ้นทดสอบวางบนฐานรองรับ
  - 3.2.1.2. ปรับสภาพขึ้นทดสอบโดยการเลื่อนแผ่นกดให้ขึ้นทดสอบผิรุปร่างกระดุมประมาณร้อยละ 50
  - 3.2.1.3. วัดความแข็ง (หลังปรับสภาพไม่เกิน 5 นาที) โดยการเลื่อนแผ่นกดลงมาแตะกับขึ้นทดสอบแล้วใช้แรง (preload) 4.5 นิวตัน กดลงบนขึ้นทดสอบแล้ววัดความหนาของขึ้นทดสอบ โดยถือว่าความหนาที่วัดได้เป็นความหนาเดิม จากนั้นเพิ่มแรงกดจนความหนาลดลงจากเดิมร้อยละ 25 และ 65 บันทึกแรงกดเป็นกิโลกรัม (รวมแรงกด 4.5 นิวตันด้วย)
- 3.2.2. ในการทดลองนี้ทางผู้วิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ การดัดแปลงโครงสร้างโดยการซ้อนชั้น และ การดัดแปลงโครงสร้างด้วยขนาด และความถี่ของรูเจาะ ซึ่งรายละเอียดการวิจัยจะได้เสนอควบคู่ไปกับผลการทดลอง

### 3.3. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 3.3.1. การวัดความแข็งแรงแบบ Indentation Hardness

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวัดความแข็งแรงของฟองยางโดยวิธี Indentation Hardness ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.173-2519) ซึ่งเป็นวิธีที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของฟองยาง เช่น งานด้านเครื่องนอน โดยการกดตัวกดที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตรซึ่งมีขนาดเล็กกว่าชั้นทดสอบลงบนชั้นทดสอบแล้ววัดแรงกดที่ใช้ทำให้ชั้นทดสอบผิดรูปตามปริมาณที่กำหนด ซึ่งจากการทดสอบเกี่ยวกับผลของวิธีวัดความแข็งแรงแบบต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงของความแข็งที่ได้ดังรูปที่ 2 พบว่าวิธีวัดความแข็งแรงแบบ Indentation Hardness ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสามารถนำมาใช้วัดความแข็งแรงของฟองยางได้เนื่องจากการวัดโดยปรับสภาพ (condition) ชั้นทดสอบก่อนแล้ววัดความแข็งแรงของฟองยางภายในเวลาไม่เกิน 5 นาที หลังการปรับสภาพ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์น้ำหนักกดที่เปลี่ยนจากค่าเริ่มต้นและจำนวนครั้งที่กดของฟองยางความหนาแน่น 75 และ 100 kg/m<sup>3</sup> ความหนา 2 นิ้ว ที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์

#### หมายเหตุ

- D75- 0 min คือ ปรับสภาพ 1 ครั้งแล้ววัดทันที 15 ครั้ง
- D75- 2 min คือ ปรับสภาพ 1 ครั้งแล้วปล่อยไว้ 2 นาทีแล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปล่อยไว้ 2 นาทีแล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง
- D75- 5 min คือ ปรับสภาพ 1 ครั้งแล้วปล่อยไว้ 5 นาทีแล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปล่อยไว้ 5 นาทีแล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง
- D75- con 0 min คือ ปรับสภาพแล้ววัดทันทีเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปรับสภาพแล้ววัดทันทีเป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง

- D75- con 2 min คือ ปรับสภาพแล้วปล่อยไว้ 2 นาที แล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปรับสภาพแล้วปล่อยไว้ 2 นาที แล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง

- D75- con 5 min คือ ปรับสภาพแล้วปล่อยไว้ 5 นาที แล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปรับสภาพแล้วปล่อยไว้ 5 นาที แล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง

- D100- 2 min คือ ปรับสภาพ 1 ครั้งแล้วปล่อยไว้ 2 นาทีแล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปล่อยไว้ 2 นาทีแล้ววัดเป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง

จากรูปที่ 2 เป็นการวัดความแข็งแรงของฟองยางแบบต่าง ๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงที่วัดได้ในแต่ละแบบจะไม่เท่ากัน แต่แตกต่างกันไปไม่เกินร้อยละ 10 และเมื่อทำการวัดความแข็งแรงไปหลาย ๆ ครั้ง (ประมาณ 6-8 ครั้ง) พบว่าความแข็งแรงของฟองยางจะไม่เปลี่ยนแปลง

วิธีการวัดความแข็งแรงแบบปรับสภาพขึ้นทดสอบก่อน 1 ครั้งแล้วปล่อยไว้ 2 และ 5 นาที แล้ววัดความแข็งแรงที่ได้เป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปล่อยไว้ 2 และ 5 นาที แล้ววัดความแข็งแรงที่ได้เป็นค่าครั้งที่ 2 ทดสอบจนครบ 15 ครั้ง พบว่าค่าความแข็งแรงที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุดและเมื่อวัดผ่านไปจำนวน 6 ครั้งขึ้นไป ความแข็งแรงของฟองยางจะคงที่

รองลงมาเป็นการวัดค่าความแข็งแรงแบบปรับสภาพขึ้นทดสอบแล้วปล่อยไว้ 2 และ 5 นาที แล้ววัดความแข็งแรงที่ได้เป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปรับสภาพแล้วปล่อยไว้ 2 และ 5 นาที แล้ววัดความแข็งแรงที่ได้เป็นค่าครั้งที่ 2 โดยทดสอบจนครบ 15 ครั้ง พบว่าค่าความแข็งแรงของฟองยางจะคงที่เมื่อผ่านการวัดมาแล้วจำนวน 6 ครั้งขึ้นไปเช่นกัน

ส่วนการวัดความแข็งแรงแบบปรับสภาพขึ้นทดสอบก่อน 1 ครั้งแล้ววัดความแข็งแรงทันที จำนวน 15 ครั้งติดต่อกัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงที่ได้จะสูงโดยจะเริ่มคงที่เมื่อผ่านการวัดไปแล้ว 7 ครั้ง

ส่วนวิธีการวัดความแข็งแรงที่ทำให้ค่าความแข็งแรงของฟองยางที่ได้เปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือการวัดแบบปรับสภาพขึ้นทดสอบแล้ววัดทันทีเป็นค่าครั้งที่ 1 จากนั้นปรับสภาพแล้ววัดทันทีเป็นค่าที่ 2 โดยวัดจนครบ 15 ครั้งเช่นกันซึ่งค่าความแข็งแรงจะเริ่มคงที่เมื่อผ่านการวัด 8 ครั้งไปแล้ว

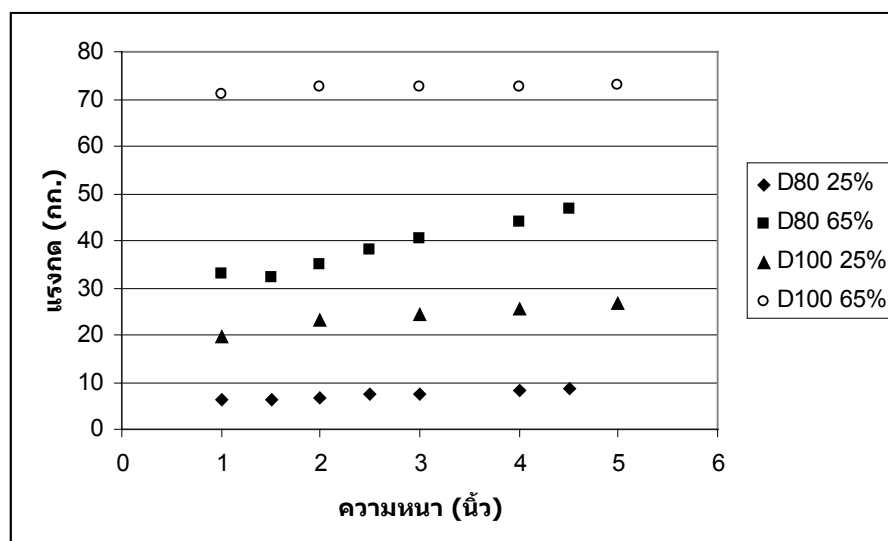
เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงที่ได้จากการวัดโดยวิธีแบบเดียวกันของฟองยางสองความหนาแน่นคือ 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีความเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงต่ำกว่าฟองยางความหนาแน่น 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจะได้ว่าฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงของความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบซ้ำหลาย ๆ ครั้งน้อยกว่าฟองยางที่มีความหนาแน่นต่ำ

จากรูปที่ 2 พบว่า การปรับสภาพก่อนการทดสอบมีผลต่อค่าความแข็งแรงที่วัดได้โดยวิธีตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยความแข็งแรงมีค่าลดลง ถ้าหากมีการพักชิ้นงานก่อนทดสอบ 2-5 นาที ค่าความแข็งแรงจะลดลงน้อยลง และเมื่อมีการทำการทดสอบซ้ำค่าความแข็งแรงจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งคง

ที่หลังจากทดสอบไป 6-8 ครั้ง ฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีความแข็งที่ลดลงน้อยกว่า แสดงให้เห็นว่าในการทดสอบเพื่อวัดค่าความแข็งนี้ โครงสร้างของฟองยางที่รับแรงบางส่วนจะถูกทำลายไปจนถึงระดับคงที่ในระดับหนึ่ง ดังนั้นเพื่อให้การทดสอบเป็นไปอย่างเที่ยงตรงที่สุดจึงต้องมีการปรับสภาพขึ้นต้นในฟองยางก่อน และระยะเวลาพักตัวหลังปรับสภาพนั้นควรต้องกำหนดให้คงที่ด้วย

### 3.3.2. ความแข็งของฟองยางธรรมชาติที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางต่างความหนาแน่น

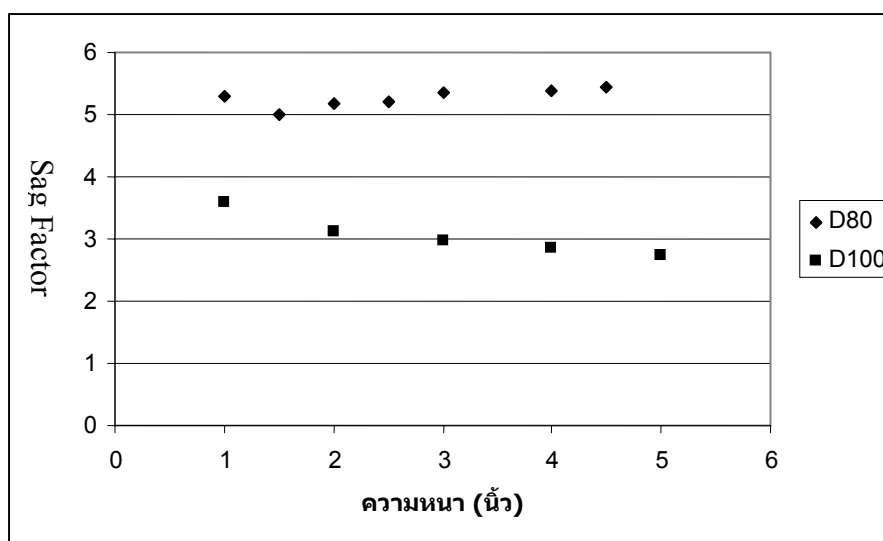
การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของความหนาของฟองยางซ้อนชั้นกันสองชั้น โดยใช้ฟองยางความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยความหนาแน่นต่ำกว่าคือ 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นที่สูงกว่าคือ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขั้นต้นจากรูปที่ 3 แสดงผลของความหนาต่อน้ำหนักกด และ Sag Factor ของยางทั้งสองความหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 4



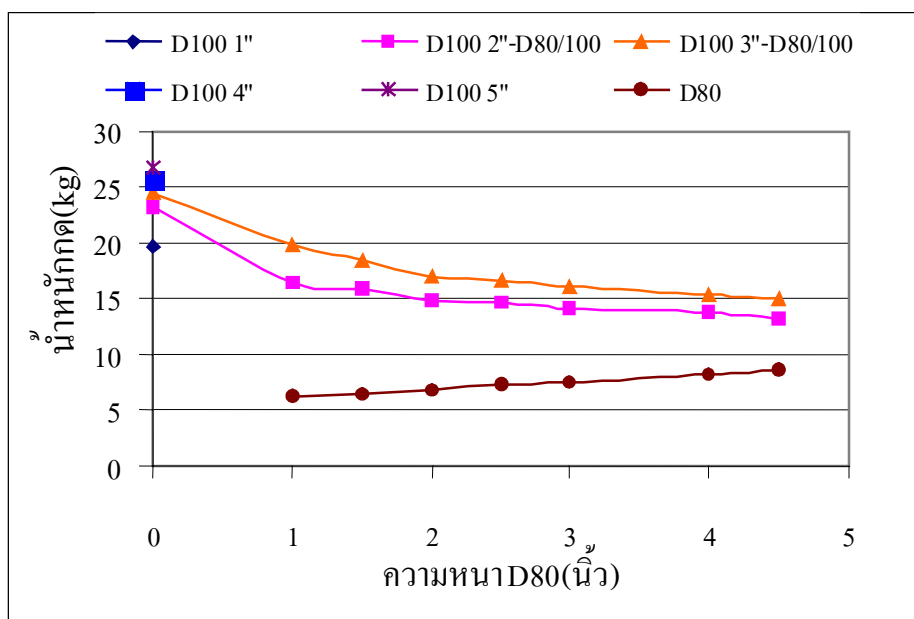
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> และฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> ที่ระยะกด 25% และ 65% ความหนาต่าง ๆ

พบว่าเมื่อความหนาของฟองยางเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักกดของฟองยางก็จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งที่ระยะกด 25 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำหนักกดระหว่างฟองยางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน นั้นต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ค่า Sag Factor นั้นมีแนวโน้มคงที่ สำหรับฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> แต่มีค่าลดลงเมื่อความหนาสูงขึ้นในฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> จากรูปที่ 3 เมื่อความหนาของฟองยางเพิ่มขึ้นน้ำหนักที่กดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการที่ฟอง

ยางมีความหนาเพิ่มขึ้นทำให้ ผลของแรงต้านจากผิวฟองยางสูงขึ้นเนื่องจากการทดสอบในลักษณะ Indentation Hardness และจะมีผลมากยิ่งขึ้นเมื่อระยะกดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าความหนาแน่นของฟองยางสูง ที่ระยะกดที่สูงนั้น ผลของแรงจากผิวฟองยางจะมีไม่มากนักเนื่องจาก แรงจากการที่ฟองยางเข้าใกล้ความเป็นยางก้อนนั้นมีมากขึ้น แต่ในกรณีที่ฟองยางบางมาก พบว่าค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์กลับเพิ่มสูงขึ้นโดยอาจจะเกิดจากแรงกระทำจากฐานรองรับของเครื่องซึ่งทำให้ค่าน้ำหนักกดที่ได้สูงขึ้นผิดปกติ ความหนาของฟองยางจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดของฟองยางน้อยกว่าชนิดหรือความหนาแน่นของฟองยางซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของฟองยางแต่ละชนิดซึ่งจะมีสมบัติทางด้านความสามารถในรับแรงที่แตกต่างกัน

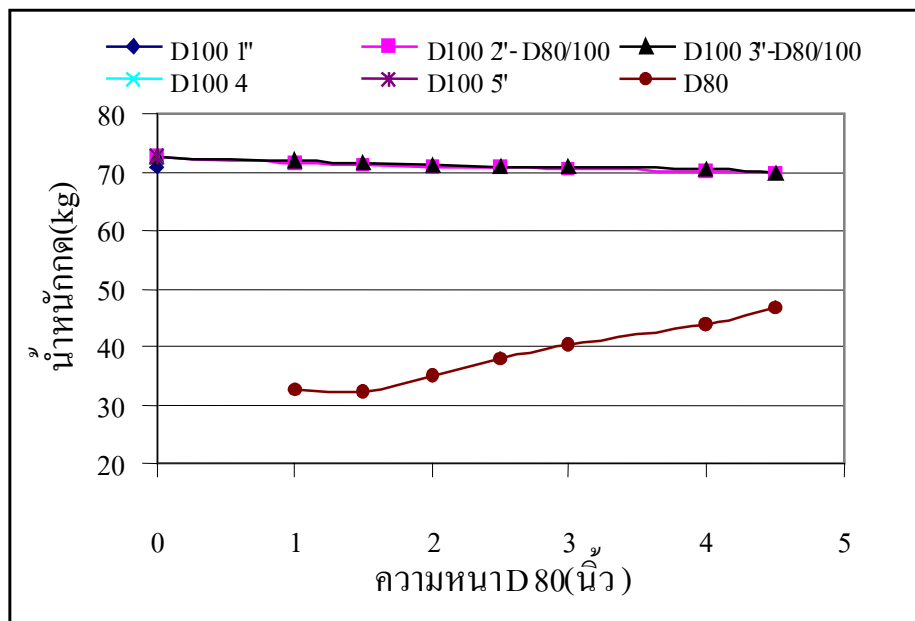


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Sag Factor ของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> และฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> ที่ระยะกด 25% และ 65% ความหนาต่าง ๆ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกุดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> 2.0 และ 3.0 นิ้ว ที่ระยะกด 25%

จากรูปที่ 5-6 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกุดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรความหนา 2 และ 3 นิ้ว โดยกดที่ระยะกด 25 และ 65 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการนำฟองยางมาซ้อนกันจะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักกุดหรือความแข็งของฟองยางได้เนื่องจากการนำฟองยางมาซ้อนกันเป็นการนำฟองยางที่มีรูพรุนแตกต่างกันมาซ้อนกัน ฟองยางที่ได้จึงประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นส่วนที่มีรูพรุนมากหรือฟองอากาศมากหรือมีเนื้อยางน้อยซึ่งก็คือส่วนฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งอยู่ชั้นบน และส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีรูพรุนน้อยหรือฟองอากาศน้อยหรือมีเนื้อยางมากซึ่งก็คือส่วนของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งอยู่ชั้นล่าง โดยทั้งสองชั้นมีความสามารถในการรับน้ำหนักกุดหรือความเค้นที่แตกต่างกันโดยที่ชั้นบนมีความสามารถในการรับน้ำหนักกุดต่ำกว่าชั้นล่าง เนื่องจากชั้นบนมีเนื้อยางน้อยกว่าหรือมีความเป็นรูพรุนมากกว่าชั้นที่ล่าง เมื่อฟองยางถูกทำให้ผิดรูปหรือทำให้เกิดความเครียดในปริมาณเท่ากัน ความเค้นที่ใช้ทำให้เกิดการผิดรูปจึงไม่เท่ากัน โดยฟองยางที่มีความสามารถในการรับน้ำหนักมากกว่าหรือมีรูพรุนน้อยกว่าจะต้องใช้ความเค้นหรือน้ำหนักกดมากกว่าเพื่อให้ฟองยางเกิดการผิดรูปในปริมาณเท่ากัน ดังนั้นค่าน้ำหนักกุดที่ได้จากการซ้อนชั้นของฟองยางจึงเป็นผลจากอิทธิพลของฟองยางทั้งชั้นบนและชั้นล่าง



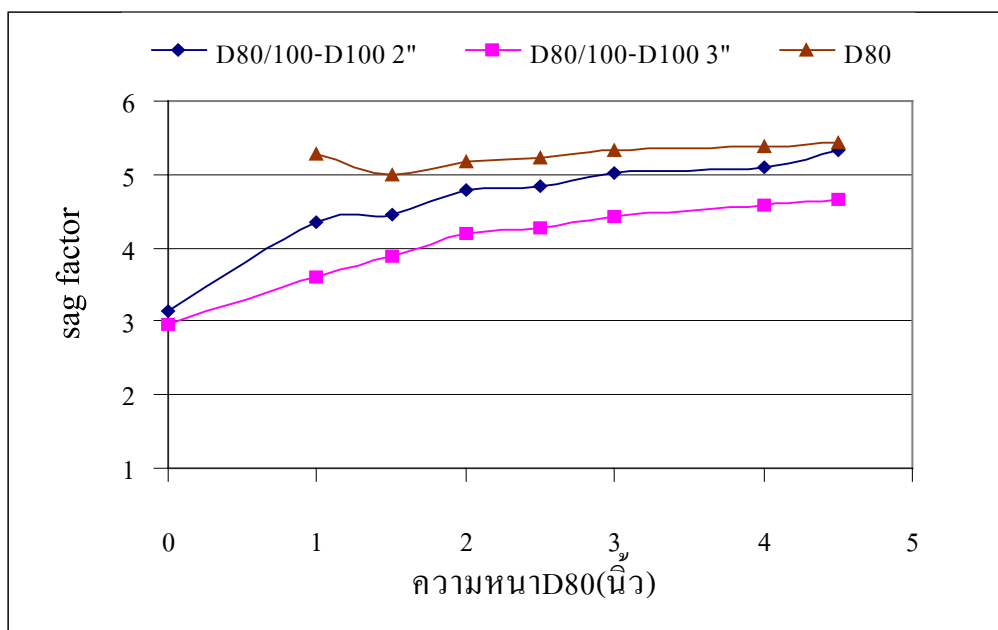
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักก่ดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> 2.0 และ 3.0 นั้ว ที่ระยะก่ด 65%

จากรูปที่ 5 ค่าน้ำหนักก่ดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่ระยะก่ด 25 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มลดลงตามความหนาของฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการก่ดฟองยางให้ผิวดรูป 25 เปอร์เซ็นต์ค่าน้ำหนักก่ดหรือความแข็งแรงของฟองที่ได้จะได้รับอิทธิพลมาจากโครงสร้างของฟองยางทั้งส่วนที่เป็นอนุภาคยางหรือเนื้อยางและส่วนที่เป็นอากาศภายในฟองยางซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักก่ดของฟองยางโดยที่อิทธิพลจากฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรหรือฟองยางชั้นบนเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองยางที่ได้มีความสามารถในการรับน้ำหนักก่ดลดลง ดังนั้นความแข็งแรงหรือค่าน้ำหนักก่ดที่ได้จึงลดลง

ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาที่ความหนาของฟองยางชั้นล่างหรือฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้นจากความหนา 2 นั้วเป็น 3 นั้ว โดยใช้ความหนาของฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคงที่ จะได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาฟองยางชั้นล่างจะทำให้ค่าน้ำหนักก่ดหรือความสามารถในการรับน้ำหนักก่ดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าแรงก่ดนั้นจะอยู่ระหว่างแรงก่ดของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้นกันและวิ่งเข้าหาชั้นที่มีความหนาสูงชันเรื่อย ๆ

จากรูปที่ 6 ค่าน้ำหนักก่ดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่ระยะก่ด 65 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มคงที่ เมื่อความหนาของฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เมตรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกดฟองยางให้ผิดรูป 65 เปอร์เซ็นต์ปริมาณอากาศจะถูกขับออกมาในปริมาณมากทำให้ค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้เกิดจากอิทธิพลของส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อเป็นหลัก ในขณะที่อิทธิพลจากส่วนที่เป็นฟองอากาศในฟองยางมีน้อยมาก ส่งผลให้ฟองยางที่ได้มีความสามารถในการรับน้ำหนักกดที่ใกล้เคียงกันแม้ว่าความหนาของฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> 2.0 และ 3.0 นิ้ว

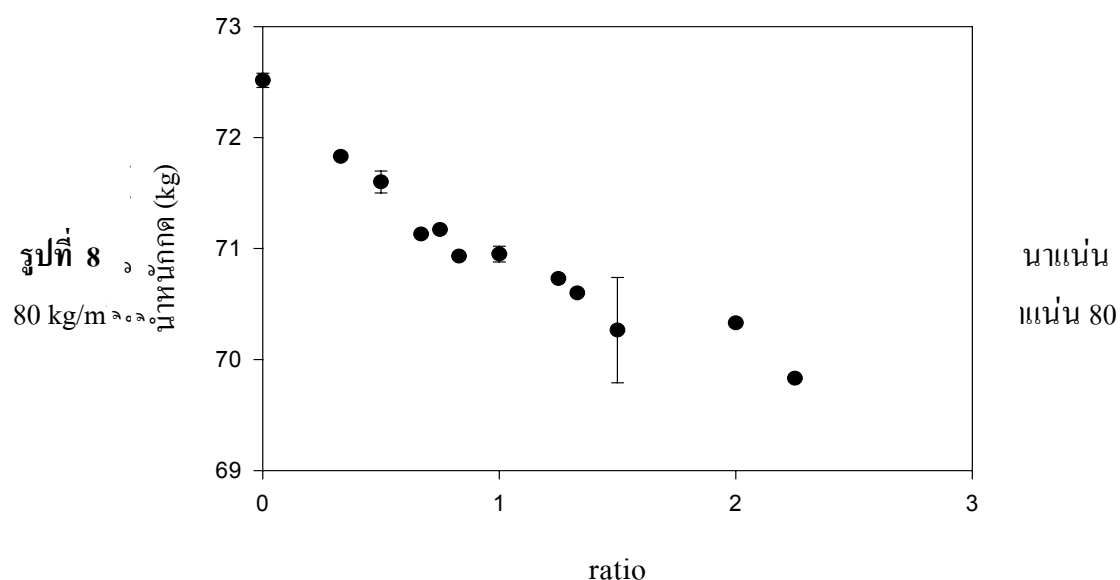
จากรูปที่ 7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรความหนา 2 และ 3 นิ้ว ค่า sag factor ในรูปที่ 7 นี้ได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 และ 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้ว่า การนำฟองยางมาซ้อนชั้นกันจะทำให้สามารถปรับเปลี่ยนค่า sag factor ของฟองยางได้ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความเป็นรูพรุนหรือปริมาณเนื้อเยื่อของแต่ละชั้นที่แตกต่างกันโดยจะส่งผลถึงความสามารถในการรับน้ำหนักกดของฟองยางที่แตกต่างกันดังเหตุผลข้างต้น

เมื่อพิจารณาที่ความหนาของฟองยางชั้นความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคงที่ ที่ความหนา 2 หรือ 3 นิ้ว จะได้ว่า การเพิ่มความหนาของฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น

80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะทำให้ค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ค่าของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การเพิ่มขึ้นของค่า sag factor จะบ่งบอกถึงความสะดวกที่ได้รับจากฟองยางที่เพิ่มขึ้นด้วย (Wolf, 1982) เนื่องจากการเพิ่มความหนาของฟองยางชั้นบน ซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าฟองยางชั้นล่างเท่ากับเป็นการลดความสามารถในการรับน้ำหนักกดของยางที่ได้จากการซ้อนชั้น โดยเฉพาะการรับน้ำหนักกดขณะสัมผัสเริ่มต้นจะมีค่าลดลงเพราะความเป็นรูพรุนของฟองยางชั้นบนที่ได้จากการซ้อนชั้นเพิ่มมากขึ้นหรือปริมาณเนื้อยางลดลงนั่นเอง ในขณะที่ความสามารถในการรับน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นหลังจากผ่านการสัมผัสเริ่มต้นจะลดลงเล็กน้อยซึ่งการรับน้ำหนักในช่วงหลังนี้จะ เป็นไปตามการออกแบบในการใช้งาน

การเพิ่มความหนาของฟองยางชั้นล่างจากความหนา 2 นิ้วเป็น 3 นิ้วโดยที่ความหนาของฟองยางชั้นบนคงที่จะทำให้ค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความหนาของฟองยางชั้นล่างหรือฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ซึ่งมีความแข็งสูงกว่าฟองยางชั้นบนจากความหนา 2 นิ้วเป็น 3 นิ้วเท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อยางหรือลดความเป็นรูพรุนของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้น ความสามารถในการรับน้ำหนักกดจึงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการรับน้ำหนักกดขณะสัมผัสเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นมากในขณะที่ความสามารถในการรับน้ำหนักกดหลังสัมผัสเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งก็คือน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 เปอร์เซนต์ ทำให้ค่า sag factor มีค่าลดลง จะเห็นว่าทั้งน้ำหนักกด และ sag factor ของยางที่นำมาซ้อนชั้นจะอยู่ระหว่างค่าของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้น

เมื่อนำค่าน้ำหนักกดและค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้น มาเขียนความสัมพันธ์กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ชั้นบน) ต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ชั้นล่าง) จะได้ดังรูปที่ 8-9

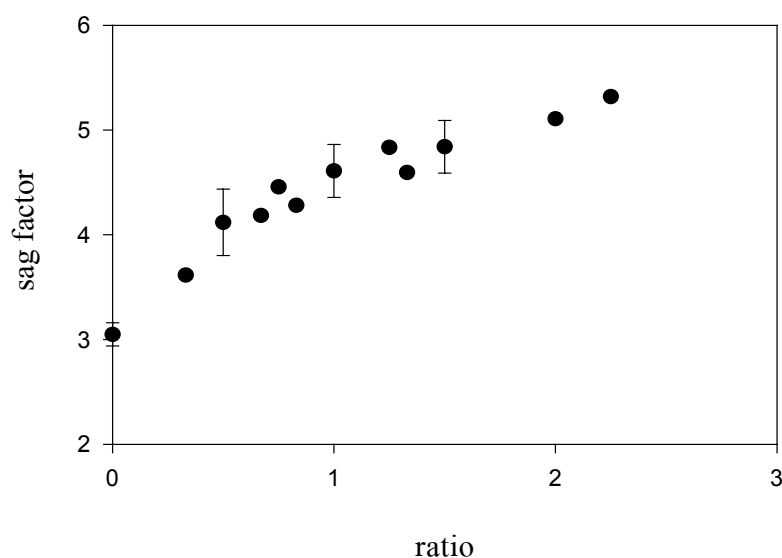


**รูปที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกด 65%

**หมายเหตุ** ratio คือ สัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$

จากรูปที่ 8-9 จะได้ว่าค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมีค่าลดลง เมื่อสัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อความหนาของฟองยางชั้นล่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความหนา ก็คือการเพิ่มขึ้นของความหนาฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น  $80$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรนั่นเอง ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นลดลงเพราะฟองยางที่ได้มีความเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นหรือปริมาณของเนื้อยางลดลงทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักกดลดลง โดยเฉพาะบริเวณชั้นบนซึ่งมีความหนาแน่น  $80$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรทำให้ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักกดโดยรวมของฟองยางที่ได้จากการซ้อนให้มียาลดลงโดยเฉพาะความสามารถในการรับน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์จะมีค่าลดลงมากกว่าที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์ เพราะการเพิ่มขึ้นของความหนาฟองยางชั้นบนจะมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์มากกว่าที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นสามารถปรับเปลี่ยนให้มียาลดลงได้โดยการเพิ่มสัดส่วนความหนาของฟองยางที่มีความหนาแน่นต่ำต่อความหนาของฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงให้สูงขึ้นนั่นเอง

ในกรณีที่ต้องการผลิตฟองยางให้มีความหนาและความแข็งโดยรวมค่าหนึ่งสามารถทำได้โดยการนำฟองยางความหนาแน่น  $80$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมาซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น  $100$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยความหนาของแต่ละชั้นที่นำมาซ้อนจะต้องมีความสอดคล้องกับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่นต่ำต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่นสูง



**รูปที่ 10** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup>

**หมายเหตุ** ratio คือ สัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup>

จากรูปที่ 10 ค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่นต่ำต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่นสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความหนา ก็คือการเพิ่มขึ้นของความหนาฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งมีความแข็งต่ำกว่าฟองยางชั้นล่าง(ฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งเป็นการเพิ่มความเป็นรูปทรงหรือลดปริมาณเนื้อยางให้กับฟองยางทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นลดลง ค่าน้ำหนักกดที่ได้จึงลดลงโดยเฉพาะค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซนต์ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักกดขณะสัมผัสกับฟองยางตอนเริ่มต้นจะลดลงมากกว่าค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 เปอร์เซนต์ทำให้ค่า sag factor ที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนความหนาฟองยางชั้นบนต่อความหนาฟองยางชั้นล่างเพิ่มขึ้น

การนำข้อมูลค่าน้ำหนักกดทั้งที่ระยะกด 25 และ 65 เปอร์เซนต์ และค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้น กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร(ชั้นบน)ต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร(ชั้นล่าง)มาเขียนความสัมพันธ์กันจะได้ดังรูปที่ 8-10 โดยจากรูปที่ได้เป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมการผลิตฟองยาง เนื่องจากรูปที่ได้จะบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกดหรือความแข็งของฟองยางกับสัดส่วนความหนาของฟองยางแต่ละชั้นที่นำมาซ้อนกัน โดยจากรูปของความสัมพันธ์นี้ ทำให้สามารถออกแบบให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดและค่า sag factor ตามที่ต้องการได้ โดยที่ความแข็งที่ต้องการก็จะมีสัมพันธ์กับสัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนและชั้นล่างที่นำมาซ้อนกันนั้นเมื่อต้องการออกแบบให้ฟองยางมีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดและค่า sag factor ค่าหนึ่งโดยมีความหนาค่าหนึ่ง สามารถทำได้โดยการนำชั้นบนและชั้นล่างความหนาต่าง ๆ มาซ้อนกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Ratio} = X/Y \quad (6)$$

$$X+Y = Z \quad (7)$$

โดย ratio คือ สัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อความหนาของฟองยางชั้นล่าง

X คือ ความหนาของฟองยางชั้นบน

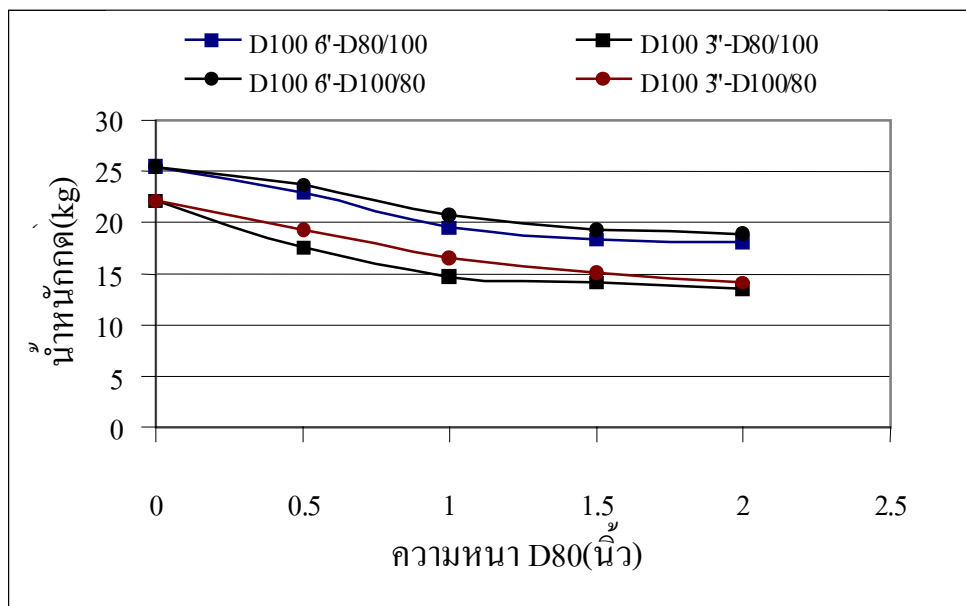
Y คือ ความหนาของฟองยางชั้นล่าง

Z คือ ความหนาของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้น

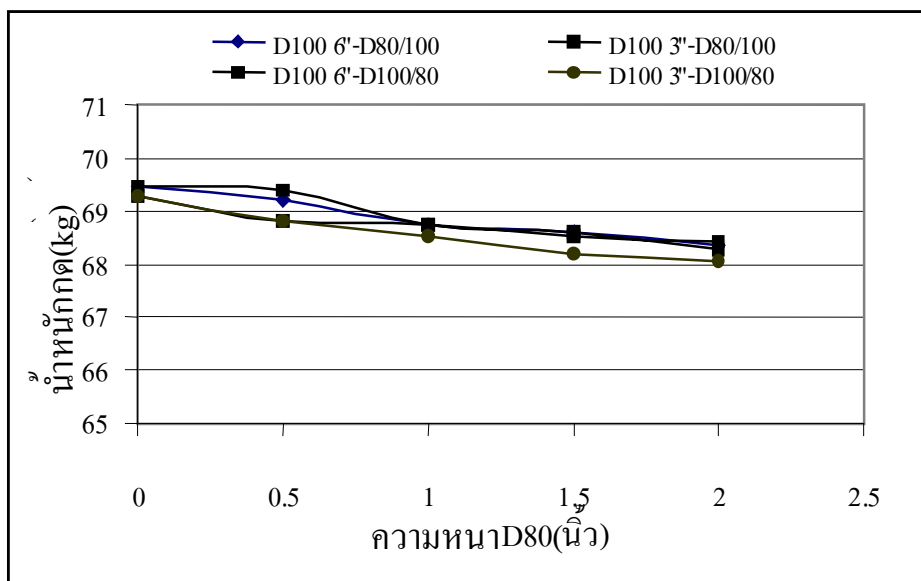
ตัวอย่างเมื่อต้องการผลิตฟองยางความหนา 6 นิ้วที่มีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซนต์เท่ากับ 16 กิโลกรัม หรือมีความแข็งหรืออยู่ในระดับข้อขึ้นคุณภาพ (RC) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.173-2519) เท่ากับ 40

สามารถผลิตฟองยางได้โดยนำฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรความหนา 2.6 นิ้วมาซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรความหนา 3.4 นิ้วซึ่งตรงกับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเท่ากับ 0.75 เป็นต้น

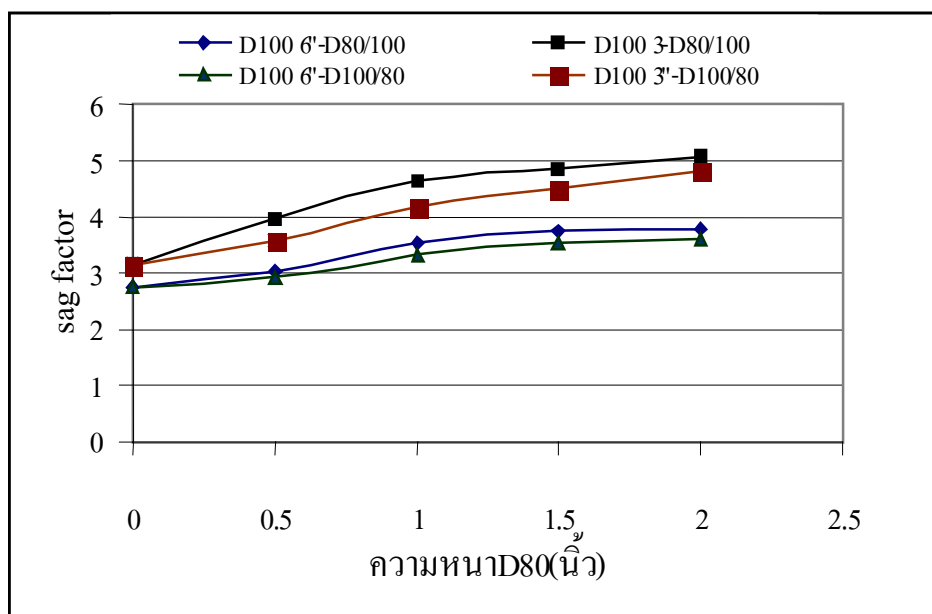
### 3.3.3. ผลของการสลับชั้นต่อความแข็งและค่า sag factor ของฟองยาง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> และฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> 3 และ 6 นิ้ว ที่ระยะกด 25 เปอร์เซนต์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักดูดของฟองยางที่ได้จากการช้อนขึ้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  และฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  3 และ 6 นิ้ว ที่ระยะกด 65 เปอร์เซนต์



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการช้อนขึ้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  และฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  3 และ 6 นิ้ว

จากรูปที่ 11-13 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรโดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 3 และ 6 นิ้ว โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 นิ้วตามลำดับ

จากรูปที่ 11 เป็นค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์ของการซ้อนชั้นทั้งสองแบบ จะได้ว่า การซ้อนชั้นโดยใช้ฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้ค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์ต่ำกว่าการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากฟองยางที่มีความหนาแน่นต่ำชั้นบนนั้นทำให้น้ำหนักกดที่ต้องใช้มีค่าลดลง

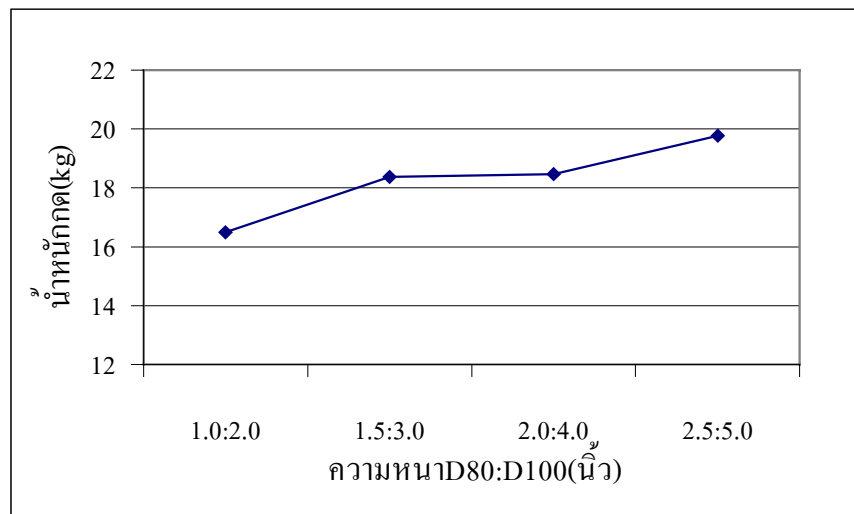
จากรูปที่ 12 ผลของการกลับด้านทำให้อ่านน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์มีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากกดฟองยางให้ผิวดรูป 65 เปอร์เซ็นต์ทำให้ปริมาณอากาศในฟองยางถูกขับออกมาในปริมาณมากเหมือนกันทั้งการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่เกิดจากอิทธิพลของส่วนที่เป็นเนื้อยางเป็นหลักเหมือนกันดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักกดจึงใกล้เคียงกัน ความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์จึงใกล้เคียงกัน

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 และ 25 เปอร์เซ็นต์จากการกลับด้านในการซ้อนชั้นทำให้ค่า sag factor ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่การซ้อนชั้นโดยใช้ฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่า sag factor สูงกว่าการซ้อนชั้นโดยใช้ฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเล็กน้อยเนื่องจากมีค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์ต่ำกว่าในขณะที่ค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 13

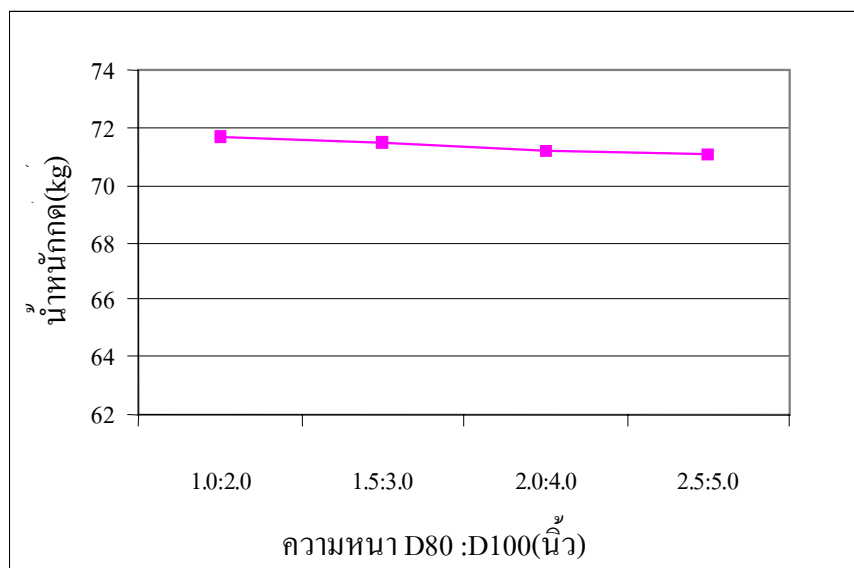
การกลับด้านในการซ้อนชั้นทำให้ความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อเทียบอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาของฟองยางชั้นบนและชั้นล่าง

### 3.3.4. ผลของสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่นสูงและต่ำ

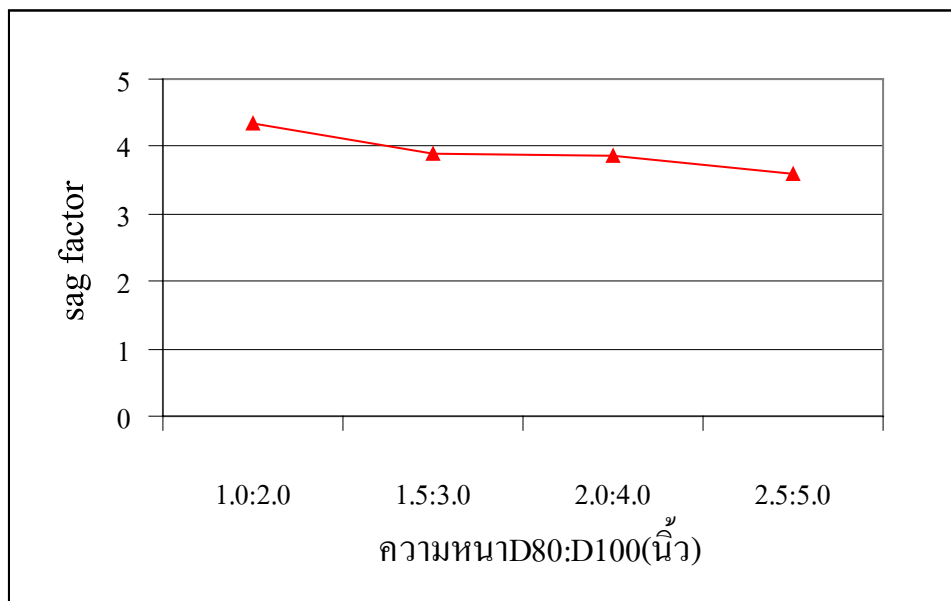
3.3.4.1. การช้อนชั้นที่สัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่นสูงต่อความหนาแน่นต่ำเท่ากับ 0.5



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกกดของฟองยางที่ได้จากการช้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกกด 25%

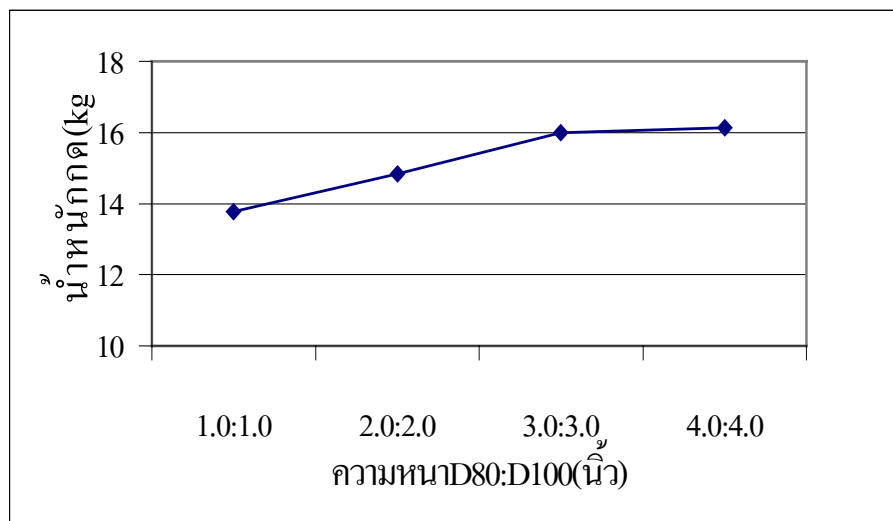


รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกกดของฟองยางที่ได้จากการช้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกกด 65%

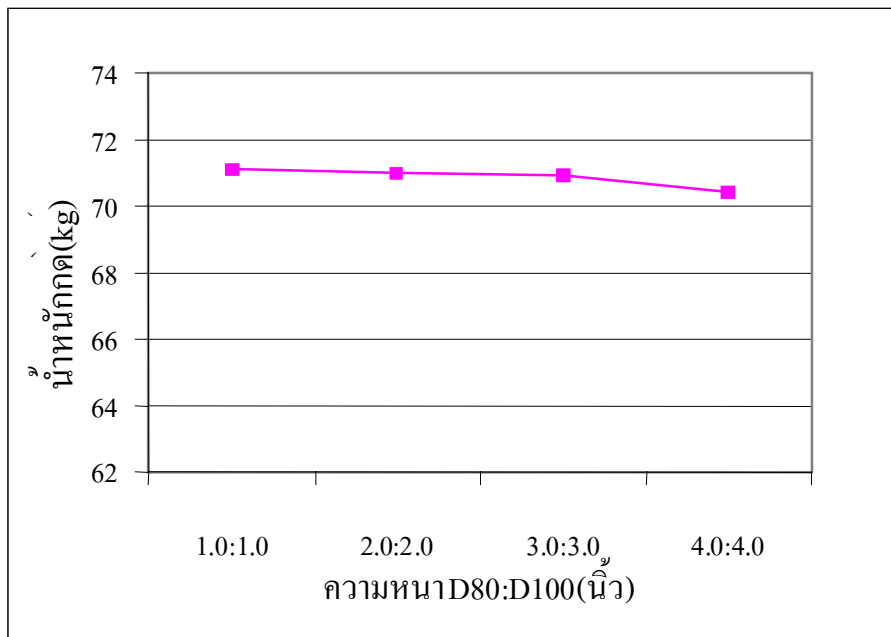


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$

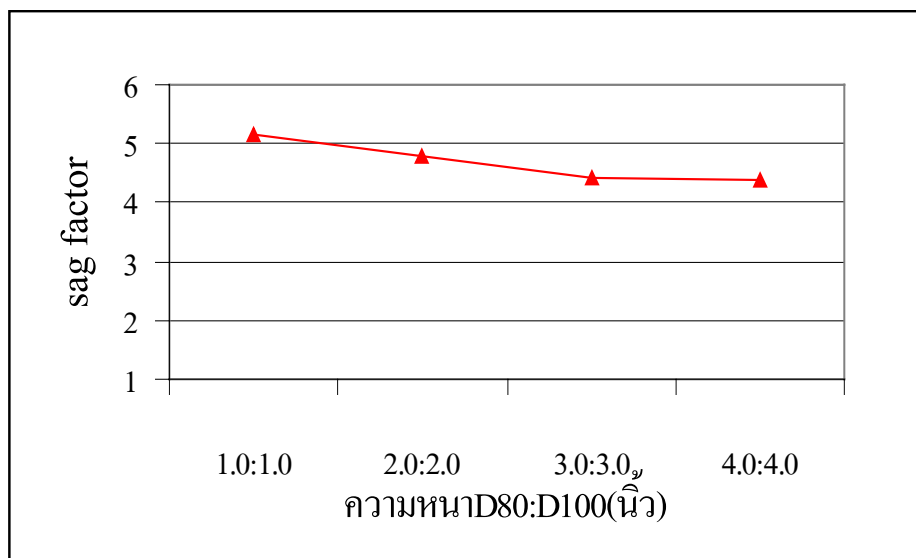
#### 3.3.4.2. การซ้อนชั้นที่สัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อชั้นล่างเท่ากับ 1.0



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักดูดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกด 25%

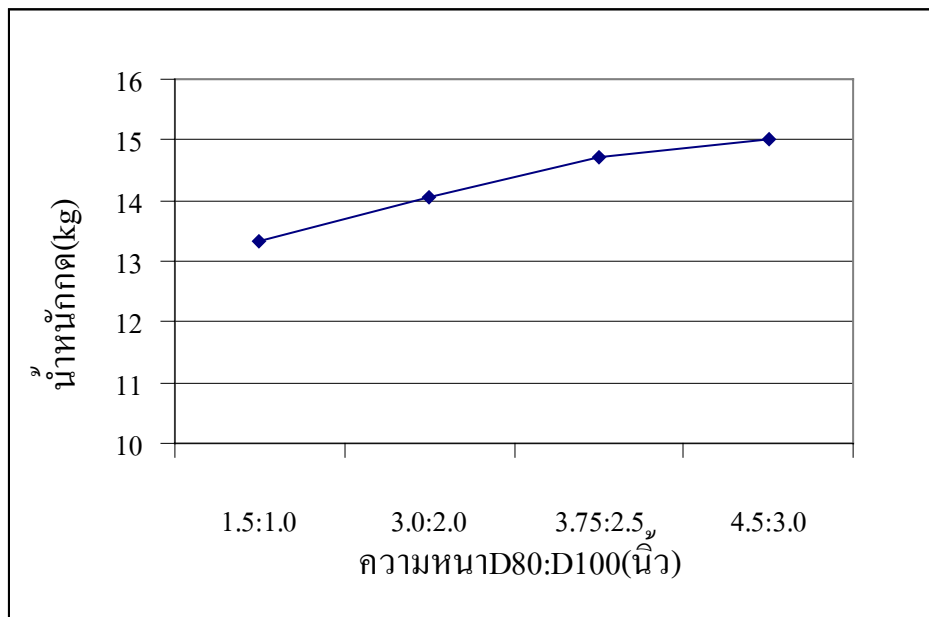


รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกวดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกวด 65%

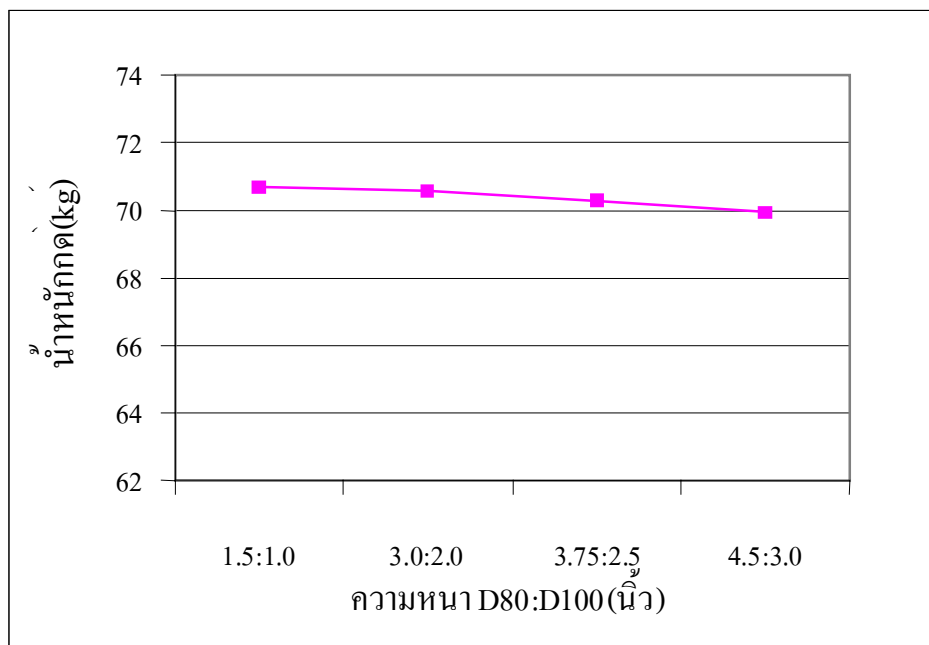


รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$

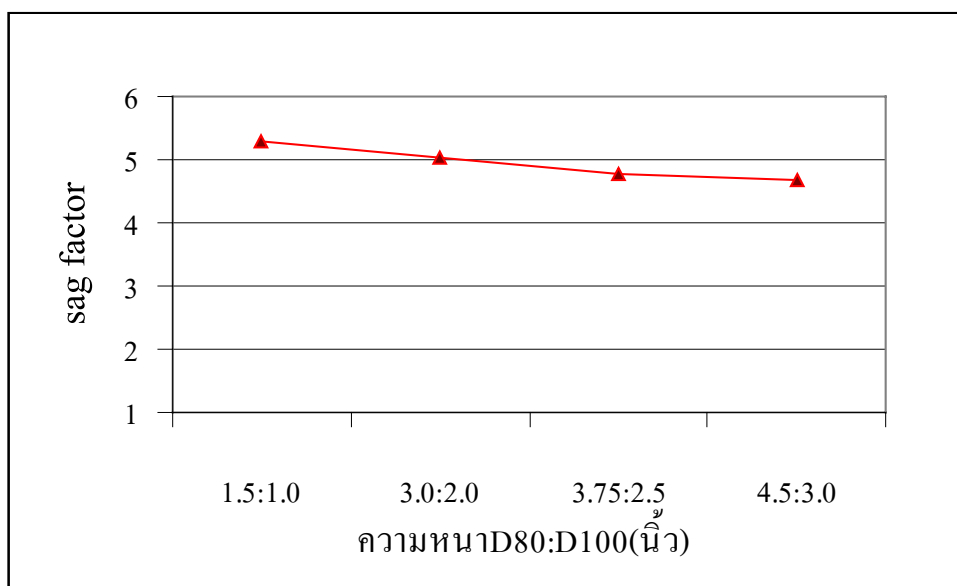
### 3.3.4.3. การซ้อนชั้นที่สัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อชั้นล่างเท่ากับ 1.5



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรกของฟองยางที่ได้จากการช้อนขึ้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกด 25%



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรกของฟองยางที่ได้จากการช้อนขึ้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกด 65%



**รูปที่ 22** ความสัมพันธ์ระหว่าง sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> บนฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 kg/m<sup>3</sup> ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น 100 kg/m<sup>3</sup>

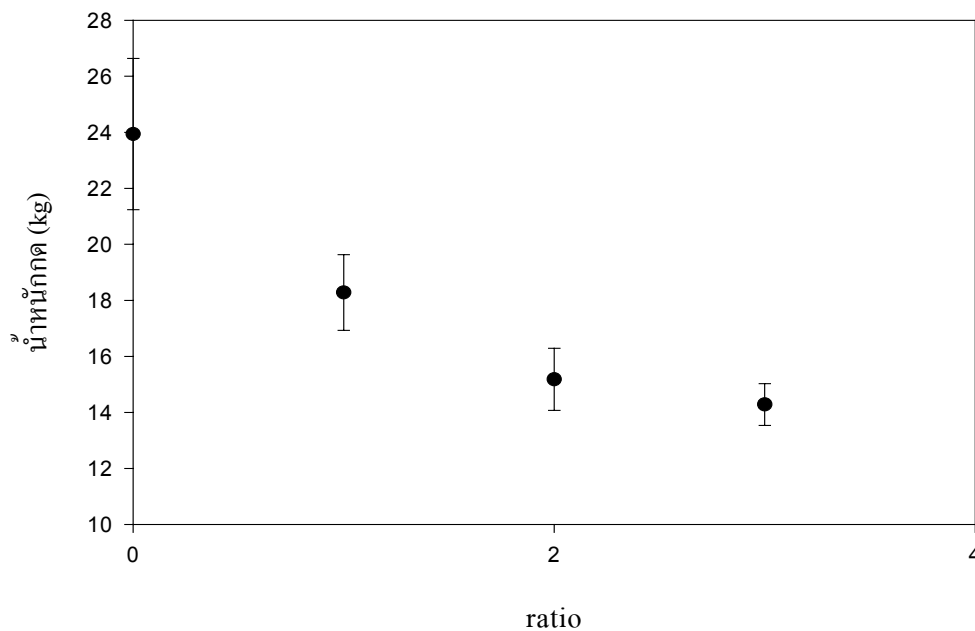
จากการทดลองพบว่าที่สัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อความหนาของฟองยางชั้นล่างเดียวกัน ฟองยางที่ได้จะมีค่าน้ำหนักกดหรือความแข็งไม่เท่ากัน คือเพิ่มสูงขึ้นตามความหนารวมที่สูงขึ้นเช่นเดียวกับที่พบในชั้นฟองยางชั้นเดียว

ความแตกต่างกันระหว่างค่าน้ำหนักกดหรือความแข็งของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่สัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อชั้นล่างเดียวกันเกิดจากสมบัติในการรับน้ำหนักของฟองยางที่ต่างกัน นั่นคือฟองยางที่มีปริมาณเนื้อยางมากกว่าก็จะมีสามารถในการรับน้ำหนักกดสูงกว่าทำให้สามารถต้านต่อความเค้นที่มากระทำได้มากกว่า ดังนั้นในการกดฟองยางให้ผิดรูปขนาดเท่ากันฟองยางที่มีปริมาณเนื้อยางมากย่อมให้ค่าน้ำหนักกดสูงกว่าฟองยางที่มีปริมาณเนื้อยางน้อย ซึ่งจะส่งผลให้มีค่า sag factor ที่แตกต่างกัน ความสบายที่ได้รับจึงแตกต่างกัน

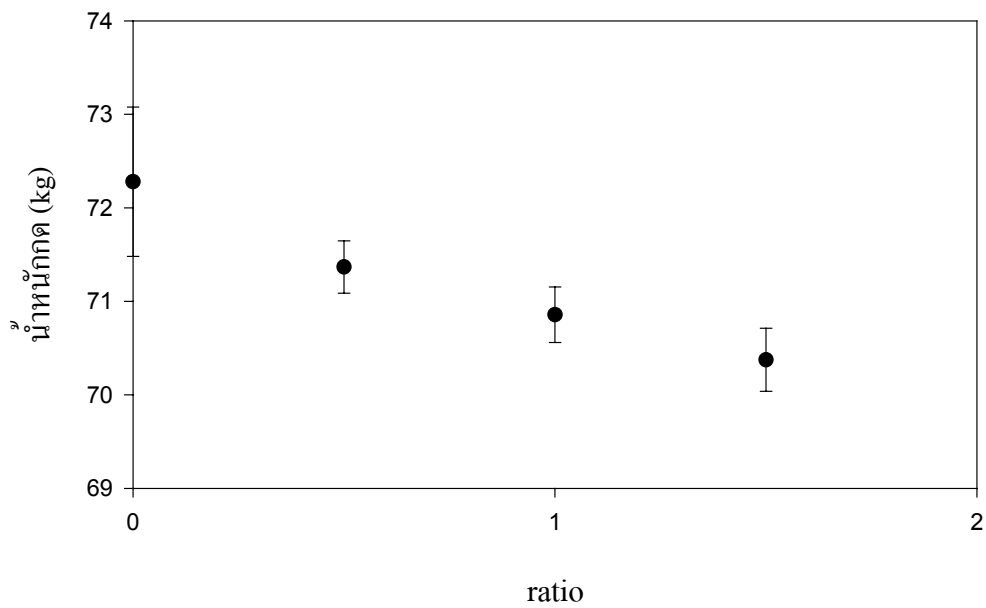
จากรูปที่ 14, 17, และ 20 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นกับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ชั้นบน) ต่อ ความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ชั้นล่าง) ที่สัดส่วน (ratio) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้ว่าเมื่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นก็จะเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 15, 18 และ 21 ค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่สัดส่วน (ratio) เท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์มีค่าลดลงแต่ลดลงน้อยมาก เช่นเดียวกับที่พบในการทดลองที่ผ่านมา

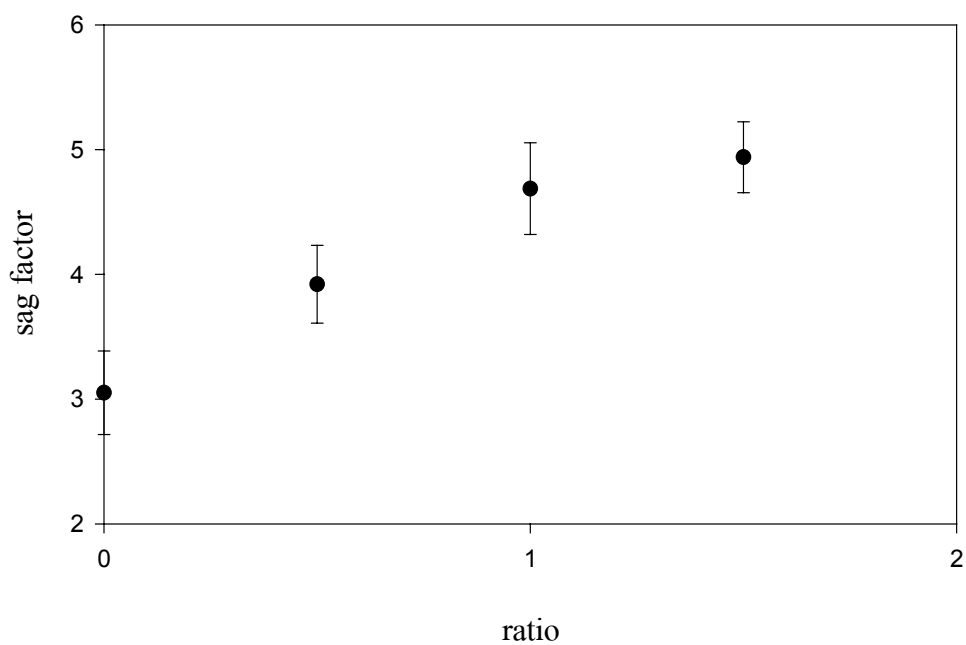
การลดลงของค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์ในขณะที่ค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นทำให้ค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นลดลงดังรูปที่ 16, 19 และ 22



**รูปที่ 23** ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกด 25%



**รูปที่ 24** ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  ที่ระยะกด 65%



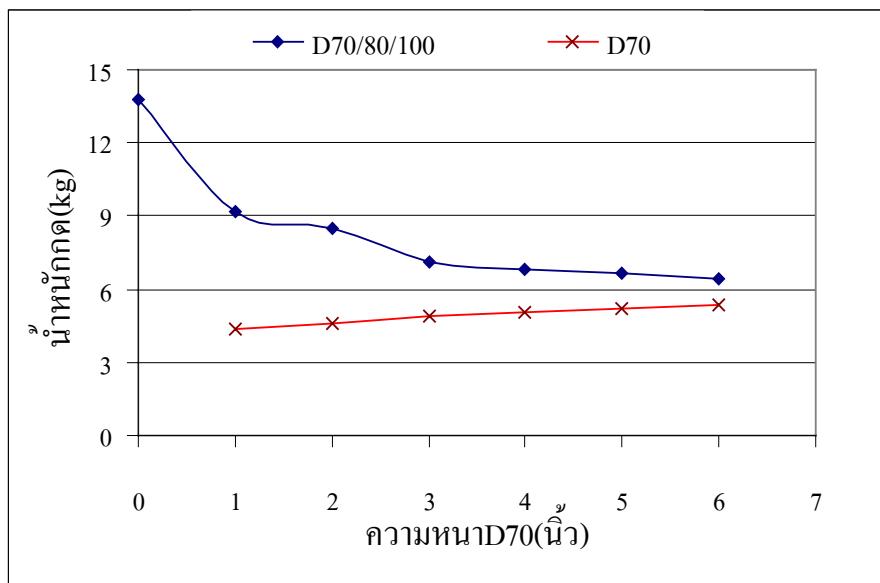
**รูปที่ 25** ความสัมพันธ์ระหว่าง sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$

**หมายเหตุ** ratio คือ สัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80 \text{ kg/m}^3$  ต่อความหนาฟองยางความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$

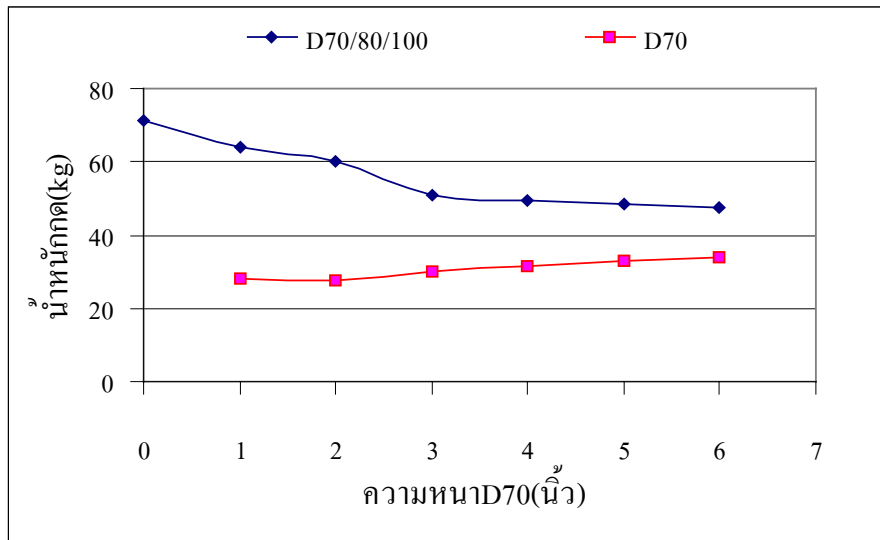
เมื่อนำค่าน้ำหนักกดและค่า sag factor ที่ได้จากการซ้อนชั้นที่สัดส่วน 0.5, 1.0 และ 1.5 มาเขียนความสัมพันธ์กับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นที่ระยะกด 25 และ 65 เปอร์เซนต์มีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนความหนาของการซ้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าลักษณะของกราฟที่ได้ในรูปที่ 23, 24 และ 25 มีความสอดคล้องกับกราฟของการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในผลการทดลองที่ 4.3

จากการทดลองจะเห็นว่า การซ้อนชั้นที่สัดส่วนความหนาของฟองยางชั้นบนต่อชั้นล่างเดียวกัน ความหนาของฟองยางที่นำมาซ้อนจะมีผลต่อความแข็งแรงของฟองยางที่ได้ไม่มากนัก โดยความหนาของฟองยางที่นำมาซ้อน โดยเฉพาะฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะมีผลต่อค่าความแข็งแรงที่ระยะกด 25 เปอร์เซนต์มากกว่าที่ระยะกด 65 เปอร์เซนต์ โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมากที่สุดคือ สมบัติที่ได้จากตัวของฟองยางเองที่นำมาซ้อน นั่นคือฟองยางที่มีความหนาแน่นต่างกันก็จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ต่างกัน เนื่องจากการมีพื้นฐานวิทยาที่แตกต่างกัน ความแข็งแรงของฟองยางที่ได้จึงแตกต่างกัน

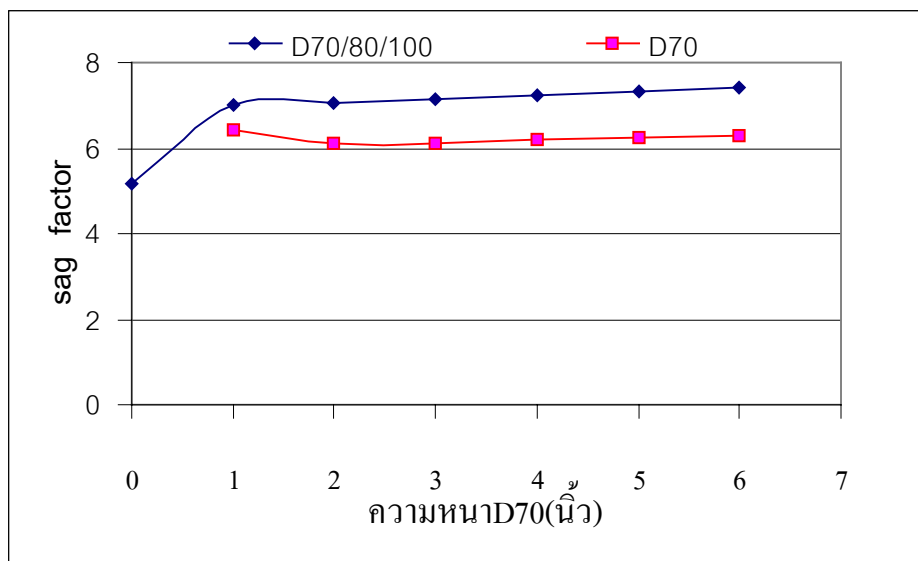
### 3.3.5. ความแข็งแรงของฟองยางธรรมชาติที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางที่มีความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางที่มีความหนาแน่น 80 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกักตของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $70 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $80$  และ  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $70 \text{ kg/m}^3$  โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80$  ต่อ  $100 \text{ kg/m}^3$  หนา 1 ต่อ 1 นิ้ว ที่ระยะกอด 25%



รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกคของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $70 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $80$  และ  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $70 \text{ kg/m}^3$  โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80$  ต่อ  $100 \text{ kg/m}^3$  หนา 1 ต่อ 1 นิ้ว ที่ระยะกค 65%



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $70 \text{ kg/m}^3$  บนฟองยางความหนาแน่น  $80$  และ  $100 \text{ kg/m}^3$  กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $70 \text{ kg/m}^3$  โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80$  ต่อ  $100 \text{ kg/m}^3$  หนา 1 ต่อ 1 นิ้ว

จากรูปที่ 26-27 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกคของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น  $70$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น  $80$  และ  $100$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ความหนาของฟองยางความหนาแน่น  $80$  กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เมตรต่อความหนาของฟองยางความหนา 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรคงที่ 1 ต่อ 1 นิ้ว แล้วแปรความหนาของฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตั้งแต่ 0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 นิ้วตามลำดับ โดยวัดน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 และ 65 เปอร์เซนต์ พบว่าการนำฟองยางมาซ้อนชั้นให้มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นจากเดิมสองชั้นเป็นสามชั้น ทำให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดอยู่ระหว่างค่าน้ำหนักกดของฟองยางชั้นบนหรือฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรกับฟองยางชั้นกลางหรือฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและฟองยางชั้นล่างหรือฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากการนำฟองยางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันมาซ้อนกันจะทำให้ได้ฟองยางที่โครงสร้างแตกต่างกัน 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของฟองยางชั้นบน(ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)ซึ่งมีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดต่ำที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการรับน้ำหนักกดต่ำเพราะโครงสร้างของฟองยางชั้นนี้มีรูพรุนสูงที่สุดหรือปริมาณเนื้อยางต่ำที่สุด ส่วนชั้นที่สองเป็นส่วนของฟองยางชั้นกลาง (ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)ซึ่งมีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดอยู่ระหว่างส่วนแรกและส่วนที่สาม และส่วนที่สามเป็นส่วนของฟองยางชั้นล่าง(ความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)ซึ่งมีความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดสูงที่สุดเพราะมีความสามารถในการรับน้ำหนักกดที่สูงที่สุด เนื่องจากมีความเป็นรูพรุนต่ำหรือมีเนื้อยางสูงที่สุด การเพิ่มส่วนของฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะทำให้ฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นมีค่าน้ำหนักกดลดลงเนื่องจากการเพิ่มโครงสร้างส่วนที่มีความแข็งต่ำให้กับฟองยางทำให้ความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการรับน้ำหนักจึงลดลงมากขึ้น โดยเฉพาะค่าน้ำหนักกดที่ระยะกด 25 เปอร์เซนต์จะลดลงมากกว่าค่าน้ำหนักที่ระยะกด 65 เปอร์เซนต์ การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้เป็นผลให้ค่า sag factor ของฟองยางมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็นการลดความสามารถในการรับน้ำหนักกดของฟองยางดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจะมีผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักกดขณะเริ่มต้นสัมผัสลดลงอย่างมาก ในขณะที่ความสามารถในการรับน้ำหนักกดหลังจากการสัมผัสเริ่มต้นแล้วจะลดลงจากเดิมที่ซ้อนโดยฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรไม่มากนัก

ดังนั้นจะได้นำฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมาซ้อนชั้นเพิ่มจากเดิมที่มีเพียง 2 ชั้น คือ ชั้นของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรทำให้สามารถลดความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นได้และยังส่งผลให้ฟองยางมีค่า sag factor เพิ่มสูงขึ้นและเมื่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งทำให้ค่าน้ำหนักกดหรือความแข็งที่ได้ลดลงส่วนค่า sag factor ก็จะยิ่งสูงขึ้นนั่นคือความสบายที่ได้รับจากฟองยางก็สูงขึ้นด้วยดังรูปที่ 28

โดยค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 80 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะสูงกว่าค่า sag

factor ของฟองยางความหนาแน่น 70, 80 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่ยังไม่ซ้อนชั้น ซึ่งแตกต่างจากการซ้อนชั้นโดยใช้ฟองยางสองชั้นคือฟองยางความหนาแน่น 80 บนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งค่า sag factor ที่ได้มีค่าอยู่ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางความหนาแน่น 80 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ดังนั้นจะได้ว่าการซ้อนชั้นโดยใช้ฟองยางเพิ่มจากเดิมสองชั้นเป็นสามชั้นสามารถปรับเปลี่ยนค่า sag factor ให้มีค่าเพิ่มขึ้น สูงมากกว่าฟองยางชั้นต้นที่เป็นส่วนประกอบในการซ้อนชั้น

### 3.3.6. ผลของขนาดและความถี่ของรูต่อความหนาแน่นและความแข็งของฟองยาง

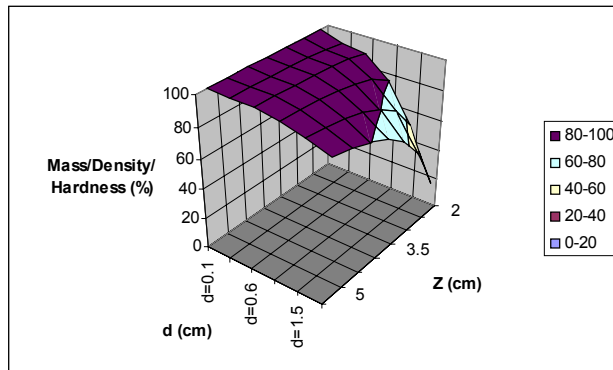
ในการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของขนาดและความถี่ของรูที่มีต่อความหนาแน่น และความแข็งของฟองยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติโดยทั่วไปนั้นมีการเจาะรูเพื่อเพิ่มการระบายอากาศ และเพื่อเป็นการลดน้ำหนักในขณะที่คุณสมบัติในการรับแรงไม่ลดลงมากนัก ความสัมพันธ์ของน้ำหนัก และความแข็งที่เปลี่ยนไปนั้นเป็นไปตามสมการที่ 2-5 อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันตลาดมีความต้องการภาพของการระบายอากาศที่ชัดเจนขึ้น รูของฟองยางนั้นจึงแตกต่างจากที่เสนอในรูปที่ 1 โดยที่ในปัจจุบันรูของฟองยางจะยาวผ่านตลอดความหนาของฟองยาง นั่นคือ ค่า  $y_1=0$  ทำให้สมการลดรูปเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} M &= \rho y R \\ H &= H_0 R \end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่  $M$  คือน้ำหนักต่อพื้นที่ของฟองยาง  $\rho$  คือความหนาแน่นของฟองยาง  $y$  คือความหนาของฟองยาง  $R$  คือ อัตราส่วนพื้นที่ตามสมการที่ 4-5  $H$  คือความแข็งของฟองยางที่มีรู และ  $H_0$  คือ ความแข็งของฟองยางที่ไม่มีรู

จากความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นนี้ ความหนาแน่นสมมูลของฟองยาง (bulk density) จึงมีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกับสมการที่ 6 ความหนาแน่นสมมูลนั้นคือความหนาแน่นโดยรวมของฟองยางทั้งชิ้น ที่หาจากน้ำหนักของฟองยาง และปริมาตรของฟองยางที่ไม่ได้หักปริมาตรที่หายไปจากการเจาะรู

เมื่อมีความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นนี้แล้ว การดัดแปลงโครงสร้างโดยการปรับเปลี่ยนขนาดและความถี่ของรูที่มีความยาวตลอดความหนาของฟองยางนั้น จะทำให้น้ำหนัก และความแข็งของฟองยางเปลี่ยนไปในอัตราเดียวกันตามรูปที่ 29

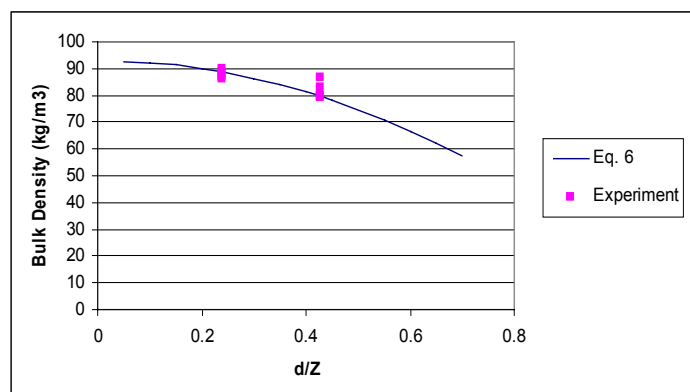


รูปที่ 29 แสดงร้อยละของมวล, ความหนาแน่น และความแข็ง ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาด (d) และความถี่ (Z) ของรู

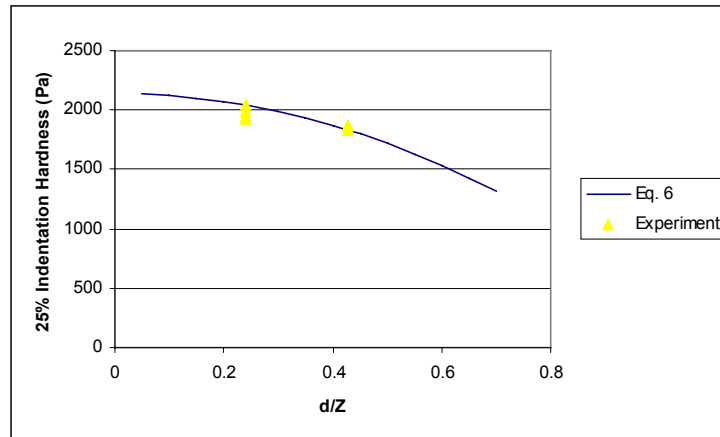
ในรูปนี้เป็นการแสดงถึงฟองยางสมมุติขนาด  $1 \times 1 \times 1$  ลูกบาศก์เมตร ที่มีความหนาแน่น, มวล และความแข็งก่อนการเจาะรู เท่ากับ 100 จากรูป d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรู (ซม.) และ Z คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของรู โดยกำหนดให้รูมีการเรียงตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยม (รูปที่ 1b) ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่ R สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูคือ 0.1-2.0 ซม. และ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางรูมีค่าระหว่าง 2-5 ซม. มวล, ความหนาแน่น และความแข็งจะมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 เป็นส่วนมาก และจะมีค่าน้อยลงมากเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางรูมีขนาดใหญ่ขึ้นพร้อมกับระยะระหว่างจุดศูนย์กลางใกล้เคียงกันมากขึ้น

ฟองยางขนาด  $4 \times 20 \times 20$  ซม.<sup>3</sup> ถูกเตรียมขึ้นในสามลักษณะคือ แบบตัน, แบบเจาะรูเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 ซม. ระยะห่าง 2.5 ซม. และ แบบเจาะรูใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 ซม. ระยะห่าง 3.5 ซม. ผลของความหนาแน่นสมมูล และความแข็งเมื่อเทียบกับสมการที่ 6 เป็นไปตามรูปที่ 30 และ 31



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสมมูลของฟองยางต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะห่างของรู



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะห่างของรู

รูปที่ 30-31 แสดงถึงผลจากการคำนวณด้วยสมการที่ 4 และ 6 และจุดคือค่าที่วัดจากการทดลอง จะเห็นได้ว่าสมการที่ 4 และ 6 นั้นสามารถใช้ในการทำนายมวล และความแข็งของฟองยางที่เปลี่ยนไปตามขนาดและระยะห่างของรูได้ดี ซึ่งหมายความว่าเราสามารถใชสมการที่ 4 และ 6 เพื่อคำนวณออกแบบคัดแปลงความแข็งของฟองยางได้อย่างเหมาะสม

### 3.4. สรุปผลการทดลอง

ฟองยางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันจะมีความแข็งที่ต่างกัน ฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความแข็งสูงกว่าฟองยางที่มีความหนาแน่นต่ำทั้งที่ระยะกด 25 และ 65 เปอร์เซนต์ เนื่องจากฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนต่ำกว่า

ฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงมีค่า sag factor ต่ำกว่าฟองยางที่มีความหนาแน่นต่ำ หรือฟองยางความหนาแน่นสูงให้ความสบายต่ำกว่าฟองยางความหนาแน่นต่ำ

การซ้อนชั้นของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนความแข็งของฟองยางได้หลากหลายยิ่งขึ้น โดยฟองยางที่ซ้อนชั้นนั้นจะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างฟองยางที่นำมาซ้อนกัน และคุณสมบัติด้านความแข็ง และค่า sag factor นั้นจะขึ้นกับสัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อสัดส่วนความหนาของการซ้อนเพิ่มขึ้น ความแข็งของฟองยางที่ได้จากการซ้อนจะลดลง ส่วนค่า sag factor จะเพิ่มขึ้น

การนำฟองยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมาซ้อนบนฟองยางความหนาแน่น 80 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งต่ำกว่าการซ้อนฟองความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟองยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพียงสองชั้น

เมื่อความหนาของฟอยางความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพิ่มขึ้นจะทำให้ความแข็งหรือค่าน้ำหนักกดของฟอยางที่ได้จากการซ้อนชั้นลดลง โดยเฉพาะที่ระยะกด 25 เปอร์เซ็นต์จะลดลงมาก ในขณะที่ระยะกด 65 เปอร์เซ็นต์จะลดลงเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ค่า sag factor ที่ได้ยังสูงกว่าการซ้อนชั้นของฟอยางความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรบนฟอยางความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพียงสองชั้น และสูงกว่า sag factor ของความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าฟอยางจากการซ้อนชั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฟอยางที่นำมาซ้อนชั้น

การดัดแปลงความหนาแน่นสมดุล และความแข็งโดยการเจาะรูที่มีขนาด และระยะห่างต่างกัน จะเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่รับแรง ซึ่งสามารถที่จะคำนวณได้จากอัตราส่วนพื้นที่ความหนาแน่นสมดุล, มวล และความแข็ง จะเปลี่ยนไปด้วยอัตราที่เท่ากัน

## สรุปผลการดำเนินงาน และผลที่ได้รับ

### ตารางแผนงาน

| กิจกรรม                                      | การปฏิบัติงาน | เดือนที่ |   |   |   |   |   |
|----------------------------------------------|---------------|----------|---|---|---|---|---|
|                                              |               | 1        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1. เปลี่ยนแปลงขนาดของช่องว่าง                | แผนงาน        | ●        | ● |   |   |   |   |
|                                              | ปฏิบัติจริง   |          |   |   | ● | ● |   |
| 2. เปลี่ยนแปลงความถี่ของช่องว่าง             | แผนงาน        |          | ● | ● |   |   |   |
|                                              | ปฏิบัติจริง   |          |   |   | ● | ● |   |
| 3. เปลี่ยนแปลงการเรียงชั้น                   | แผนงาน        |          |   | ● | ● |   |   |
|                                              | ปฏิบัติจริง   | ●        | ● | ● |   |   |   |
| 4. วิเคราะห์ผลขั้นต้น และ เขียนรายงานฉบับย่อ | แผนงาน        |          | ● | ● |   |   |   |
|                                              | ปฏิบัติจริง   |          |   | ● | ● |   |   |
| 5. ศึกษาผลของการซ้อนชั้น และ Sag Factor      | แผนงาน        |          |   |   | ● | ● |   |
|                                              | ปฏิบัติจริง   | ●        | ● | ● | ● | ● |   |
| 8. วิเคราะห์ผล และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์     | แผนงาน        |          |   |   |   | ● | ● |
|                                              | ปฏิบัติจริง   |          |   |   |   | ● | ● |

### ตาราง Output

| Output                                                                                                     |          | สาเหตุในกรณีล่าช้า และ<br>การแก้ไข |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------------------------|
| กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ                                                                                    | ผลสำเร็จ |                                    |
| 1. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการวัดความแข็งแบบ Indentation Hardness และ การใช้ดัชนีความนุ่มสบายแบบ SAG Factor | 100%     |                                    |
| 2. ได้ความสัมพัทธ์ของความแข็ง และขนาด, ความถี่ของรูเจาะ                                                    | 100%     |                                    |
| 3. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการคัดแปลงคุณสมบัติด้านความแข็งโดยการซ้อนชั้น                                    | 100%     |                                    |
| 4. สรุปผลและเขียนรายงานวิจัย                                                                               | 100%     |                                    |
| 5. อื่น ๆ                                                                                                  |          |                                    |

## เอกสารอ้างอิง

1. มอก. 173-2519, 2519, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยางฟองน้ำ, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ
2. Blackley, D.C. (1997), *Polymer Latices : Science and Technology*, 2<sup>nd</sup> Edition, Vol. 3, Chapman&Hall, London.
3. Calvert, K.O. (1982), *Polymer Latices and Their Applications*, Applied Science Publishers Ltd, London.
4. Madge, E.W, (1962), *Latex Foam Rubber*, Maclaren & Son Ltd, London.
5. Talaley, J.A.(1954) , *Ind. Eng. Chem.*, **46**, 1530.
6. Rogers, T.H., and Hecker, K.C. (1958), *Rubber World*, **139**, 387.
7. Wolfe, H.W. (1982), “Cushioning and Fatigue”, Chapter 3, *Mechanics of Cellular Plastics*, Hilyard, N.C., Ed., Applied Science Publishers, London.
8. Dunlopillo Commercial Pamphlet.

### ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยจะเห็นว่าความแข็งแรงของฟองยาง รวมทั้งความสบายของฟองยางที่วัดโดยดัชนี sag factor นั้นจะถูกตัดแปลงได้โดยการซ้อนชั้น หรือการกำหนดขนาดและความถี่ของรูเจาะในฟองยางธรรมชาติ นั้นแสดงให้เห็นว่าอุตสาหกรรมฟองยางธรรมชาติ มีทางเลือกในการควบคุมความแข็งแรงของฟองยางธรรมชาติทั้งก่อน และหลังกระบวนการผลิต เพิ่มอิสระและความหลากหลายให้แก่การออกแบบและพัฒนารูปแบบและการใช้งานของสินค้าอย่างไม่มีจำกัด โดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นจากผลการวิจัยนี้เป็นแกนหลักในการออกแบบพัฒนา

เนื่องจากจุดมุ่งหมายของการวิจัยนี้เพื่อให้เป็นผลงานที่วิจัยที่สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ทันที และเป็นงานวิจัยระดับปลายน้ำอย่างแท้จริง การต่อยอดงานวิจัยชิ้นนี้คือการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมเท่านั้น จึงจะได้ประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตามการวัดความแข็งแรงโดยวิธีที่ใช้ในการวิจัยนี้ ยังคงค่อนข้างจำกัดในรูปแบบข้อมูลที่ได้จากการวัดเป็นคุณสมบัติของวัสดุ การที่จะได้ข้อมูลใกล้เคียงกับการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบเบาะรองรับนั้น การวิจัยโดยมีการวัด interface pressure ที่เกิดขึ้นจากการใช้งานฟองยางธรรมชาติที่รูปแบบต่าง ๆ กันนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจและควรมีการศึกษาวิจัยต่อไป

## ภาคผนวก

เผยแพร่ผลงานในรูปแบบของการนำเสนอโปสเตอร์ในงานวิชาการวันวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ระหว่างวันที่ 17-18 สิงหาคม 2547

เผยแพร่ผลงานในรูปแบบของการนำเสนอโปสเตอร์ในงานวันยางพาราแห่งชาติ  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ระหว่างวันที่ 20-21 สิงหาคม 2547

# โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (2) :

## ผลของโครงสร้างมหภาคต่อความแข็งของฟองยางธรรมชาติ”

### Research and Development of Natural Rubber Latex and Products- PSU small project group (2) : Effect of Macrostructure on Hardness of Natural Rubber Foam.

#### Executive Summary

คุณสมบัติในการรับแรงของฟองยางธรรมชาติจะถูกควบคุมจากความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ฟองยางธรรมชาติดังกล่าวยังสามารถที่จะนำมาดัดแปลงโดยการเจาะรูขนาด และความถี่ต่าง ๆ กัน หรือ นำมาซ้อนชั้นด้วยความแข็งและความหนาต่าง ๆ กันได้ เพื่อดัดแปลงคุณสมบัติการรับแรงโดยรวมของผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยถึงการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติการรับแรงของฟองยางโดยการ คัดแปลงโครงสร้างทางมหภาค โดยศึกษาผลของการดัดแปลงเหล่านี้ต่อความแข็ง และค่า sag factor ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับความสบายสำหรับฟองยางที่ใช้ในงานเบาะรองนั่ง

การศึกษานำพาการนำฟองยางมาซ้อนชั้นกันสองชั้น ทำให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งและค่า sag factor ของฟองยางที่ซ้อนชั้น อยู่ในช่วงคุณสมบัติของยางตั้งแต่ที่นำมาซ้อนชั้นกัน โดยมีอัตราส่วนความหนาแน่นระหว่างชั้นเป็นตัวแปรที่ควบคุมผลของความแข็ง และ sag factor ของฟองยางซ้อนชั้นที่ได้ เมื่อทำการซ้อนสามชั้นพบว่าค่า sag factor ของยางที่ซ้อนชั้นนั้น สามารถให้ค่าที่สูงกว่าค่า sag factor ของฟองยางดั้งเดิมได้ การดัดแปลงด้วยการเจาะรูขนาดของรู และความถี่ของรูต่าง ๆ กัน พบว่า ความหนาแน่นสมมูล (bulk density) และความแข็งจะแปรตามอัตราส่วนพื้นที่รับแรง โดยความแข็ง และความหนาแน่นสมมูลจะมีค่าลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรูใหญ่ขึ้น และระยะห่างระหว่างรูก็ลดลง

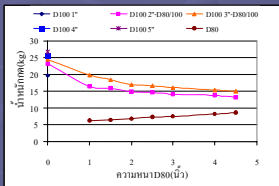
#### ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ฟองยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์น้ำยางที่สำคัญอีกผลิตภัณฑ์หนึ่ง ความแข็งของฟองยางธรรมชาตินั้นจะถูกควบคุมโดยความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการดัดแปลงทางด้านกายภาพที่เป็นระดับมหภาคนั้นยังทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของชั้นฟองยาง นำมาซึ่งความยืดหยุ่นในการออกแบบสินค้าตามความต้องการของตลาดอีกด้วย การดัดแปลงเหล่านี้ได้แก่ ฟองยางที่มีรูลักษณะรูสี่เหลี่ยม และรูปร่างต่าง ๆ กัน, การเจาะรูที่ขนาด และความถี่ต่าง ๆ กัน และการนำชั้นของยางมาแข็งต่าง ๆ กันมาซ้อนชั้นกันที่ความหนา และลำดับชั้นต่าง ๆ กัน เป็นต้น จะเห็นว่าชั้นฟองยางที่มีความแข็งพื้นฐานระดับหนึ่งจะสามารถนำมาดัดแปลงได้อย่างนับไม่ถ้วนเพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ลักษณะต่าง ๆ กันตามความเหมาะสม

#### วัตถุประสงค์

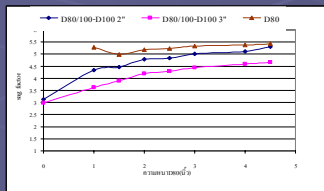
- เพื่อที่จะศึกษาถึงการเพิ่มความสบายที่วัดด้วยดัชนี Sag Factor ด้วยวิธีการซ้อนชั้นด้วยฟองยางที่มีความหนา และความแข็งต่าง ๆ กัน
  - เพื่อที่จะได้ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งที่เปลี่ยนไปด้วยการดัดแปลงด้านกายภาพด้วยการเจาะช่องว่างที่มีขนาด และความถี่ต่าง ๆ กัน
- #### วิธีการทดลอง
- เตรียมฟองยางธรรมชาติขนาด 30x30 ซม. ความหนา 2.5-15 ซม. ความหนาแน่น 70, 80, และ 100 กก/ม.<sup>3</sup> วางซ้อนชั้นกัน
  - วัดความแข็งแบบ Indentation Hardness ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [มอก. 2519]
  - เตรียมฟองยางธรรมชาติที่มีการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6, 1.5 ซม. ระยะห่าง 2.5, 3.5 ซม. เพื่อวัดความแข็ง

#### ผลการทดลอง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กก/ม.<sup>3</sup> กับฟองยางความหนาแน่น 100 กก/ม.<sup>3</sup> ที่ระยะกล 25%

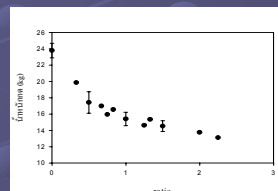
จากรูปที่ 1 จะเห็นว่าฟองยางที่ซ้อนชั้นกันมีความแข็งแรงระหว่างฟองยางที่นำมาซ้อนชั้นกัน และเมื่อมีสัดส่วนความหนาของฟองยางที่แข็งหรือนิ่มมากขึ้น ความแข็งแรงของฟองยางซ้อนชั้นจะเพิ่ม หรือลดลงตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กก/ม.<sup>3</sup> กับฟองยางความหนาแน่น 100 กก/ม.<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กก/ม.<sup>3</sup>

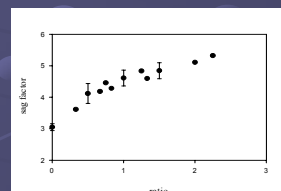
เมื่อวัดค่า sag factor ซึ่งเป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงความสบายในการใช้ฟองยางตามสมการที่ 1 พบว่าฟองยางที่ซ้อนชั้นให้ค่า sag factor อยู่ในช่วงระหว่างฟองยางที่นำมาซ้อนชั้นเช่นเดียวกันกับค่าความแข็ง ดังรูปที่ 2

$$\text{Sag Factor} = \frac{H \text{ at } 65\% \text{ deflection}}{H \text{ at } 25\% \text{ deflection}} \quad (1)$$

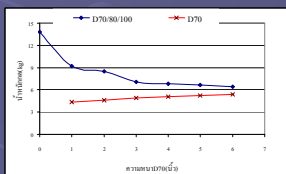


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของฟองยาง (ซ้าย) และ sag factor (ขวา) ที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 80 กก/ม.<sup>3</sup> กับฟองยางความหนาแน่น 100 กก/ม.<sup>3</sup> ที่สัดส่วนความหนาของฟองยางความหนาแน่น 80 กก/ม.<sup>3</sup> ต่อความหนาของฟองยางความหนาแน่น 100 กก/ม.<sup>3</sup>

เมื่อแปรความหนาของฟองยางที่ซ้อนชั้น โดยควบคุมสัดส่วนความหนาของฟองยาง จะพบว่าดังรูปที่ 3 ความแข็ง และ sag factor ของฟองยางที่ซ้อนชั้น จะถูกควบคุมด้วยสัดส่วนความหนาของชั้นฟองยาง

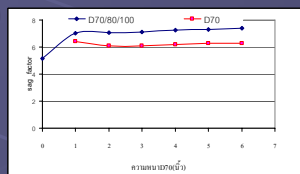


ข้อมูลดังกล่าวนี้จะเป็ประโยชน์อย่างมากในการออกแบบผลิตภัณฑ์ซ้อนชั้นเพื่อให้ได้ความแข็งและ sag factor ที่ต้องการ ในระดับความหนาแน่นที่ต้องการ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 70 กก/ม.<sup>3</sup> กับฟองยางความหนาแน่น 80 และ 100 กก/ม.<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 70 กก/ม.<sup>3</sup>

จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่าเมื่อนำฟองยางความหนาแน่นต่ำมาซ้อนชั้นที่สาม คุณสมบัติทางารรับแรงของฟองยางด้านความแข็งจะอยู่ระหว่างคุณสมบัติของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้น



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า sag factor ของฟองยางที่ได้จากการซ้อนชั้นฟองยางความหนาแน่น 70 กก/ม.<sup>3</sup> กับฟองยางความหนาแน่น 80 และ 100 กก/ม.<sup>3</sup> กับความหนาของฟองยางความหนาแน่น 70 กก/ม.<sup>3</sup>

ความสบายของฟองยาง ของฟองยางที่ซ้อนชั้นมีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าวของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้น แสดงให้เห็นว่าโดยการดัดแปลงด้วยการซ้อนชั้นนั้น นอกจากจะดัดแปลงความแข็งแล้วยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของฟองยางได้อีกด้วย

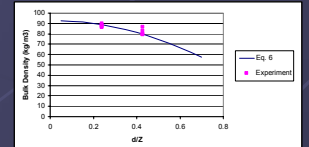
เมื่อฟองยางมีการเจาะช่องว่างเป็นรู น้ำหนัก และพื้นที่รับแรงของฟองยางจะเปลี่ยนไป ทำให้ความหนาแน่นสมมูล (bulk density) และความแข็งของฟองยางเปลี่ยนไป

รูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นสมมูลและความแข็งของฟองยาง จะแปรไปตามสมการ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยที่ R คืออัตราส่วนพื้นที่, d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรู, Z คือระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง, ρ คือความหนาแน่น, H คือความแข็ง และตัวห้อย 0 แสดงถึงค่าเริ่มต้นก่อนเจาะรู

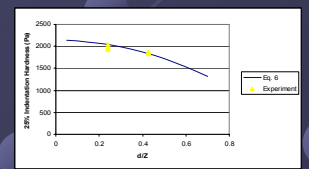
$$\rho = \lambda_0 R \quad (2)$$

$$H = H_0 R \quad (3)$$

$$R = 1 - (\pi/4)(d/Z)^2 \quad (4)$$



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสมมูลของฟองยางต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะห่างของรู



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งต่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อระยะห่างของรู

#### สรุปผลการทดลอง

- ฟองยางที่มีความหนาแน่นสูงจะมีค่าความแข็งสูง และค่า sag factor ต่ำกว่าฟองยางที่มีความหนาแน่นต่ำ
- ฟองยางที่ซ้อนชั้นนั้นจะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างฟองยางที่นำมาซ้อนกัน
- คุณสมบัติด้านความแข็ง และค่า sag factor นั้นจะขึ้นกับสัดส่วนความหนาของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้น
- การนำฟองยางที่นิ่มกว่ามาซ้อนเป็นสามชั้น ทำให้ได้ฟองยางที่มีความแข็งต่ำลง และค่า sag factor สูงขึ้น
- ค่า sag factor ที่ได้จากการซ้อนสามชั้นสูงกว่าค่า sag factor ของฟองยางที่นำมาซ้อนชั้น แสดงให้เห็นว่าฟองยางจากการซ้อนชั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฟองยางที่นำมาซ้อนชั้น
- การดัดแปลงความหนาแน่นสมมูล และความแข็งโดยการเจาะรูที่มีขนาด และระยะห่างต่างกัน จะเป็นไปตามความเปลี่ยนแปลงของพื้นที่รับแรง ซึ่งสามารถที่จะคำนวณได้จากอัตราส่วนพื้นที่ที่ ความหนาแน่นสมมูล, มวล และความแข็ง จะเปลี่ยนไปด้วยอัตราที่เท่ากัน

#### เอกสารอ้างอิง

1. มอก. 173-2519, 2519, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมฟองน้ำ, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ
2. Blackley, D.C. (1997), *Polymer Latices : Science and Technology*, 2nd Edition, Vol. 3, Chapman&Hall, London.
3. Calvert, K.O. (1982), *Polymer Latices and Their Applications*, Applied Science Publishers Ltd, London.
4. Madge, E.W. (1962), *Latex Foam Rubber*, Maclaren & Son Ltd, London.
5. Talalay, J.A. (1954), *Ind. Eng. Chem.*, **46**, 1530.
6. Rogers, T.H., and Hecker, K.C. (1958), *Rubber World*, **139**, 387.
7. Wolfe, H.W. (1982), "Cushioning and Fatigue", Chapter 3, *Mechanics of Cellular Plastics*, Hilyard, N.G. Ed., Applied Science Publishers, London.

#### คณะผู้วิจัย

อัญพร หมีอุทัย, ประยูร ศรีวัง, ชุติร เหมลา และ ดิลลิดี ลิลาธอด

\*ภาควิชาเทคโนโลยีและคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตบึงกาฬ

Email: nnattapo@bunga.psu.ac.th



สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (ความเห็นในรายงานนี้เป็นของอัญพร หมีอุทัย ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)