

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

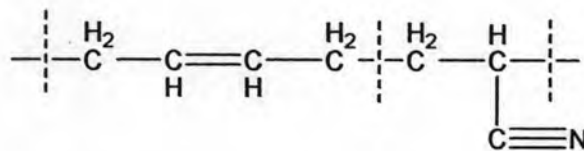


2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ยาง (Rubber)

ยางเป็นส่วนประกอบหนึ่งของผ้าเบรก เติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผ้าเบรกในด้านความเหนียว (Toughness) เนื่องจากผ้าเบรกส่วนใหญ่ใช้ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) เป็นสารยึดติด (Binder) Phenolic resin จัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต (Thermoset plastic) ทำให้มีความเปราะสูง อาจทำให้ผ้าเบรกเสียหายส่งผลให้เกิดอันตรายแก่ผู้ขับขี่รถยนต์ ยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกปัจจุบัน คือ ยางไนไตรล์บิวตะไดอิน (Nitrile Butadiene Rubber, NBR) [2]

NBR เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งเป็นโคโพลิเมอร์ของอะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และบิวตะไดอิน (Butadiene) ประกอบด้วยอะครีโลไนไตรล์ตั้งแต่ร้อยละ 18-51 ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน มีสูตรโครงสร้างตามรูปที่ 2.1 NBR เป็นยางที่มีความเป็นขั้วสูง มีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อความร้อนและทนต่อการขูดถูได้ดี จึงนิยมใช้ NBR ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ เป็นต้น



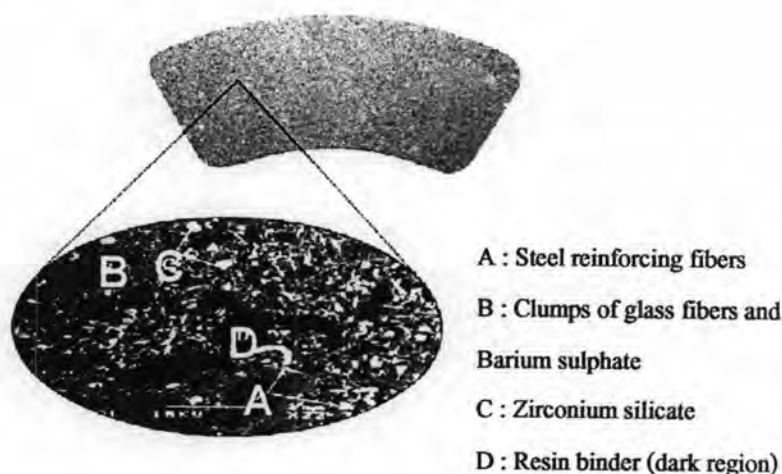
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของยาง NBR [3]

ยาง NBR ขนาดอนุภาคนาโนเมตรหรือยาง NBR นาโน (Elastomeric Nano Particles) มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเฉพาะตัวที่แตกต่างจากยางทั่วไป หรือยาง NBR ขนาดอนุภาคไมโครหรือยาง NBR ไมโคร เนื่องจากยาง NBR นาโนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 100 nm ทำให้ยาง NBR นาโนสามารถแพร่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ (polymer matrix) ได้อย่างสม่ำเสมอ และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเหนียว (toughness) ของสารพอลิเมอร์ได้ดีกว่ายาง NBR ไมโคร เนื่องมาจากการมีอันตรกิริยา (interface) ที่เพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาคของยางกับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ (polymer matrix) [4,5]

2.1.2 วัสดุเสียดทาน

วัสดุเสียดทาน เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบซับซ้อน มีลักษณะเป็นของผสมของอนุภาคค่อนข้างใหญ่ถูกยึดติดให้ติดเป็นชิ้นเดียวกันด้วยสารยึดติดซึ่งเป็นเรซิน องค์ประกอบของวัสดุเสียดทานอาจมีมากถึง 10-25 ชนิด แต่ละองค์ประกอบมีหน้าที่เฉพาะในการทำงาน บางชนิดอาจมีหน้าที่มากกว่าหนึ่งอย่าง ผ้าเบรกจัดเป็นวัสดุเสียดทานประเภทหนึ่ง ตัวอย่างขององค์ประกอบในผ้าเบรกได้แก่ สารยึดติด (binder) เส้นใย (fibers) ผงขัด (abrasives) สารตัวเติม (fillers) สารหล่อลื่น (lubricant) เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงภาพขยายลักษณะของพื้นผิวของผ้าเบรกที่มีส่วนผสมต่างๆ [6]

2.1.3 องค์ประกอบของผ้าเบรก



รูปที่ 2.2 ภาพขยายของพื้นผิวผ้าเบรก แสดงลักษณะของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบต่างๆ ที่ถูกยึดให้อยู่ด้วยกันด้วยเรซิน [6]

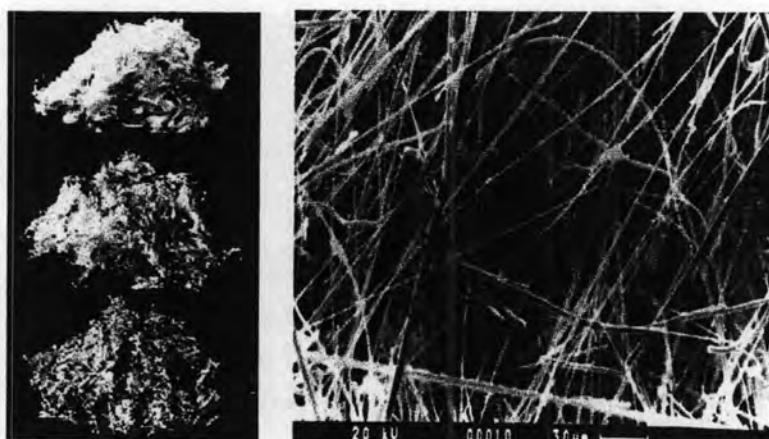
i. สารยึดติด (Binder)

ทำหน้าที่ ยึดทุกองค์ประกอบต่างๆเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงในระดับหนึ่ง สารยึดติดนี้มักเป็นสารกลุ่มฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) ทั้งในรูปแบบที่บริสุทธิ์ หรือผ่านการดัดแปร (Modified phenolic resins) โดยส่วนใหญ่แล้วฟีนอลิกเรซินชนิดดัดแปรจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางด้านเสถียรภาพ การฉีก และความกระด้างของวัสดุเสียดทาน ปริมาณสารยึดติดที่ใช้ในสูตรวัสดุเสียดทานอยู่ในช่วงประมาณ 5-20%

ii. เส้นใย (Fiber)

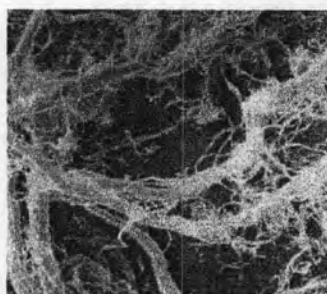
เส้นใย ทำให้การขึ้นรูปวัสดุเสียดทานง่ายขึ้น มีความคงตัวก่อนที่จะมีการอัดด้วยความร้อน สำหรับผ้าเบรกรุ่นเก่าเส้นใยที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ เส้นใยหิน (Asbestos) ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยใช้ปริมาณสูงถึง 30-70% ใยหินเป็น magnesium silicate ที่มีน้ำผลึก (Hydrated form) $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ นอกจากนี้ใยหินยังมีข้อดีอื่นที่ทำให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น

- มีความเสถียรต่อความร้อน ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 500°C ก่อนที่จะกลายเป็นซิลิเกต
- ช่วยให้พื้นผิวกลับมามีความเสียดทานอีก ในระหว่างการใช้งาน
- ซิลิเกตที่เกิดจากใยหิน ในระหว่างการใช้งานจะมีความแข็ง และสามารถในการขัดถูมากกว่าตัวใยหินเอง
- ใยหินมีความเป็นฉนวนที่ดี
- ช่วยให้การทำงานง่ายขึ้น
- ช่วยลดอัตราการสึกหรอของวัสดุเสียดทาน
- มีความแข็งแรง แต่ก็คืด โคงได้ ในขณะที่เดียวกัน
- ราคาเหมาะสม



รูปที่ 2.3 เส้นใยหิน ภาพด้านขวาเป็นภาพขยายจากกล้อง SEM [7]

เนื่องจากเส้นใยหินทำให้เกิดปัญหาทางสุขภาพได้ จึงได้มีการประกาศห้ามใช้ จึงทำให้ผู้ผลิตผ้าเบรกต่างๆหันไปหาวัสดุทดแทนอย่างอื่น เช่น เส้นใยอินทรีย์ (Aramid, PAN, polyester), เส้นใยอนินทรีย์ (เส้นใยแก้ว เส้นใยโลหะ เส้นใยเซรามิก) ตัวอย่างเส้นใยทดแทนใยหิน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



เส้นใย aramid



เส้นใยแก้ว

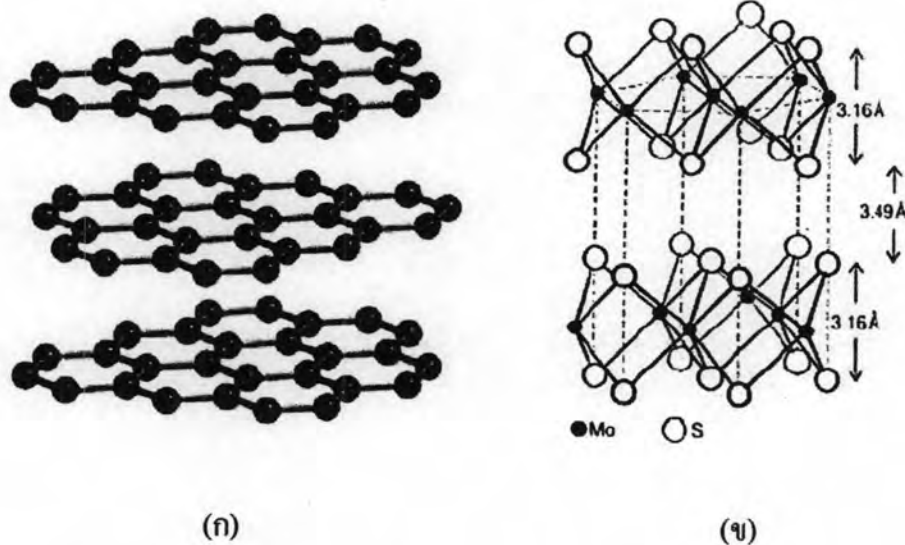


เส้นใยเหล็ก

รูปที่ 2.4 เส้นใยต่างๆ ที่นำมาใช้แทนใยหิน [7]

iii. ผงขัด (Abrasives)

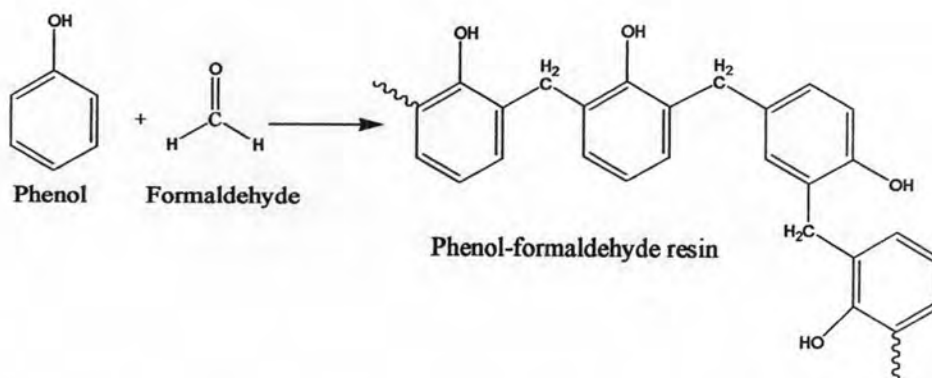
เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่มีความแข็งสูง ช่วยเพิ่มระดับของแรงเสียดทาน โดยเฉพาะในช่วงต้นของการเหยียบเบรกให้รวดเร็ว ในลักษณะของการ “จับ” หรือ “กัด” นอกจากนี้ยังช่วยในการรักษาความสะอาดของพื้นผิว (โลหะ) ที่สัมผัสกับวัสดุเสียดทาน และควบคุมการสะสมของฟิล์ม (Film) ที่เกิดบนผิวโลหะ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกที่เป็นชั้นของ (ก) กราไฟต์ และ (ข) โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ซึ่งสารทั้งชนิดเป็นของแข็งที่มี สมบัติการหล่อลื่นที่ดี [6]

2.1.4 ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)

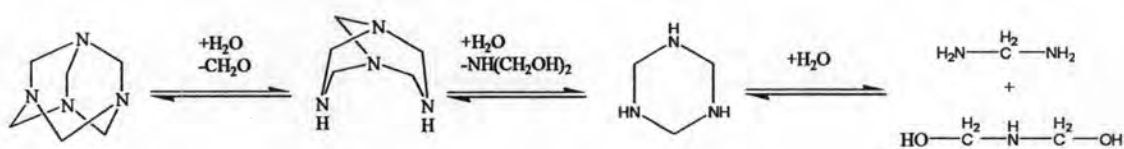
ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอล (Phenol) กับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ในสภาวะที่เป็นกรด และมีสัดส่วนต่อโมลของฟีนอลต่อฟอร์มัลดีไฮด์มากกว่าหนึ่ง โมเลกุลของฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์เข้าจับตัวกันได้โมเลกุลที่เป็นสายยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เรซินที่ได้เรียกว่า ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน ซึ่งยังจะต้องมีการเติมสารเชื่อมโยง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็น โครงสร้างร่างแหสามมิติ เพื่อสร้างความแข็งแรง ดังนั้น ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน จึงอาจเรียกว่าเป็น เรซินแบบสองชั้นตอน



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาการเกิดฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน [6]

ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) เป็น โมเลกุลเส้น (Linear) ที่ไม่ ยาวมากนัก สามารถหลอมเหลวได้เมื่อ ได้รับความร้อน ดังนั้น จึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยตรง จะต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างแต่ละ โมเลกุลของฟีนอลกับ ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน กลายเป็น โครงสร้างร่างแหขนาดใหญ่ จึงมีความแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลสูง และทนอุณหภูมิได้สูง

สารเชื่อมโยงที่ใช้ร่วมกับฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์เรซินสำหรับอุตสาหกรรมวัสดุเสียดทาน คือ เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (Hexamethylenetetramine) หรือเรียกสั้นๆว่า เฮกซะมีน (Hexamine) ซึ่งได้จากการควบแน่นของแอมโมเนีย (Ammonia) และฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) อย่างไรก็ตาม เฮกซะมีน ไม่ค่อยเสถียรภายใต้ความร้อน และอาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้หากมีน้ำอยู่ใน ระบบ ดังนั้น สิ่งที่น่าจะเกิดขึ้นไปพร้อมๆ กัน คือการสลายตัวของเฮกซะมีนเกิดเป็นฟอร์มาลดีไฮด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง โมเลกุลของโนโวแลกเรซินได้ เช่นกัน การสลายตัวของ Hexamine นี้สังเกตได้ง่ายจากการมีกลิ่นแอมโมเนียเกิดขึ้นในระหว่าง กระบวนการอัดร้อน การที่มีแอมโมเนียหลุดออกมา จึงทำให้มีความจำเป็นต้องลดความดันใน ระหว่างกระบวนการอัดร้อน เพื่อไม่ให้แอมโมเนียถูกกักขังเป็น ไพรองอากาศในวัสดุเสียดทาน

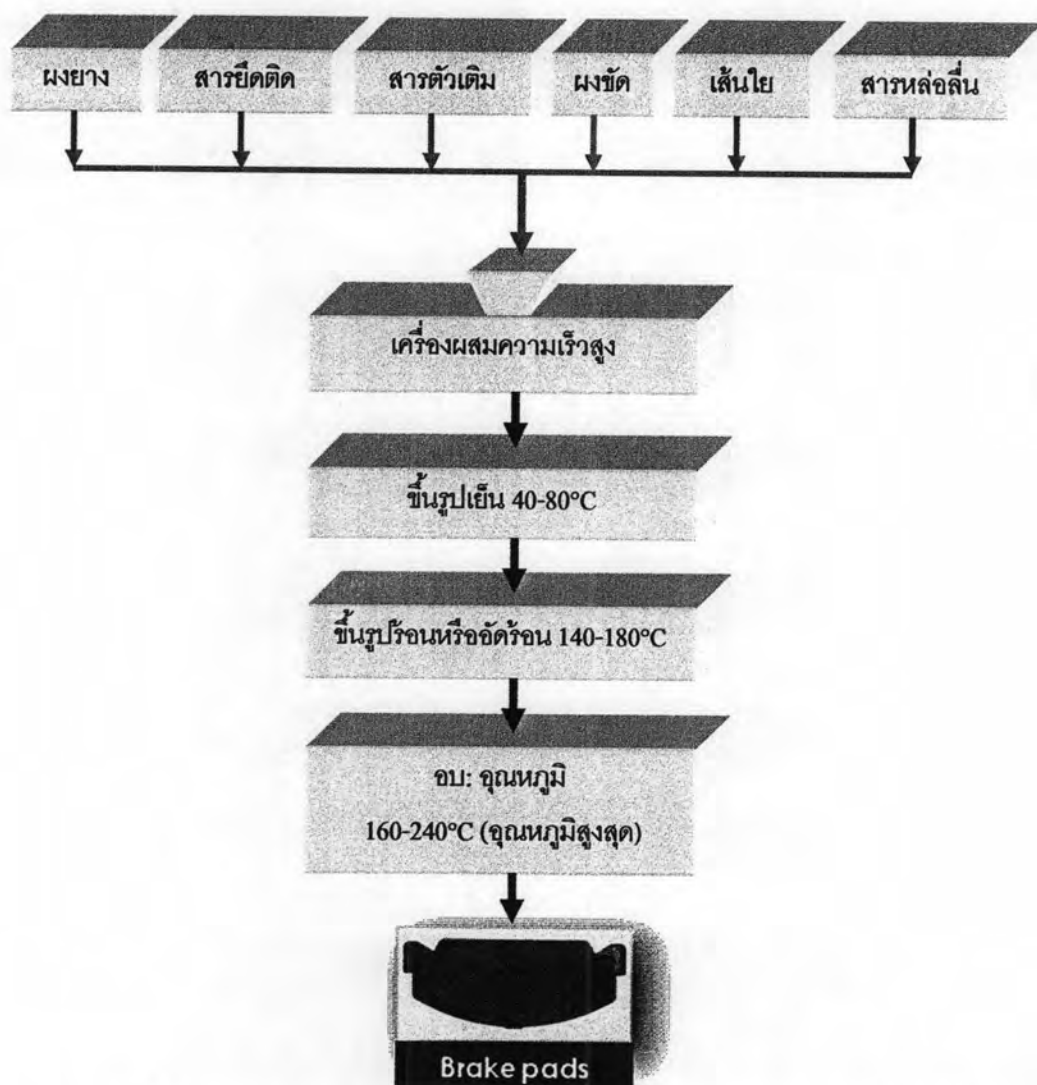


รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาการสลายตัวของเฮกซะมีน [6]

การสังเคราะห์ Phenolic resin จะต้องมีการควบคุมขนาด โมเลกุลของฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ เรซินเพื่อให้มีสมบัติการไหล และจุดหลอมเหลวตามต้องการ นอกจากนี้ การทำปฏิกิริยาระหว่าง Phenol กับ Formaldehyde นี้ อาจมี Phenol บางส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา เหลือ Phenol อิสระที่เป็น ปัจจัยหนึ่งในการกำหนด specification ของเรซิน

2.1.5 กระบวนการผลิตผ้าเบรก

กระบวนการผลิตผ้าเบรกประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆดังแผนผังที่แสดงในรูปที่ 2.9 เริ่มต้นจากการผสมส่วนผสมต่างๆ ลงไปเครื่องผสมความเร็วสูง (High Speed Mixer) จากนั้นทำการอัดเย็นอุณหภูมิห้อง ความดัน 100 - 250 N/mm² หรือ อาจใช้อุณหภูมิ 50 - 80°C และตามด้วยการอัดร้อน อุณหภูมิ 140 - 180°C ความดัน 20 - 80 N/mm² สุดท้ายนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วทำการอบบ่ม โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 160°C ถึง 240°C (สูงสุด) ระยะเวลา 14 - 20 ชั่วโมง



รูปที่ 2.9 แผนผังกระบวนการทั่วไปในการผลิตวัสดุเสียดทาน ชนิดดิสก์เบรก

2.1.6 ผ้าเบรก

ผ้าเบรกที่ผลิตในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด สาเหตุมาจากความต้องการที่แตกต่างกันของผู้บริโภค ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของราคาและคุณภาพ ผ้าเบรกในอุตสาหกรรมเบรกจึงต้องมีการพัฒนาตลอดเวลา นอกจากนี้การพัฒนาของเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมยานยนต์และปัญหาข้อปฏิบัติที่เข้มงวดขึ้นทางด้านสิ่งแวดล้อม เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้อุตสาหกรรมผ้าเบรกต้องมีการพัฒนาอยู่เสมอ อุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกสำหรับรถยนต์ มีวิวัฒนาการของผ้าเบรกดังนี้ [8]

ยุคที่หนึ่ง: ผ้าเบรกใช้ใยหิน (Asbestos) เป็นวัตถุดิบหลักในผ้าเบรก แต่เนื่องจากปัญหามลภาวะเป็นพิษ ผ้าเบรกชนิดนี้จึงถูกยกเลิกใช้ในรถยนต์ผลิตใหม่แต่ยังได้รับความนิยมในธุรกิจค้าปลีก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา เพราะผ้าเบรกชนิดนี้มีราคาถูก

ยุคที่สอง: ผ้าเบรกใช้ใยเหล็กหรือผงเหล็กเป็นวัตถุดิบหลักแทนแร่ใยหิน บางชนิดผสมกราไฟต์และคาร์บอนเพื่อให้เบรกมีความฝืดดีขึ้นและลดปัญหาเรื่องเสียง แต่เนื่องจากปัญหาเรื่องเสียงและเขม่าดำผ้าเบรกชนิดนี้จึงลดความนิยมลงตลอดเวลา โดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันมีการใช้อยู่น้อยกว่า 10% แต่ยังเป็นที่ยอมรับในทวีปยุโรป และตลาดค้าปลีกผ้าเบรก โดยเฉพาะตลาดค้าปลีกผ้าเบรกเมืองไทย

ยุคที่สาม: ผ้าเบรกใช้ใยสังเคราะห์หรือสารอนินทรีย์ (Organic Non-Asbestos) หรือเส้นใยสังเคราะห์ต่างๆ เป็นวัตถุดิบหลักในผ้าเบรก นอกจากนั้นผ้าเบรกรังมีส่วนผสมของโลหะอ่อน อาทิ ทองแดง หรือทองเหลือง เป็นตัวสร้างความฝืด ปัจจุบันเป็นที่นิยมมากที่สุด ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ทั่วโลก รถยนต์ใหม่มากกว่า 90% ใช้ผ้าเบรกชนิดนี้ เนื่องจากวัสดุต่างๆ ของผ้าเบรก มีประสิทธิภาพที่ดี ตอบสนองการเบรกได้ดีกว่าเนื้อผ้าเบรกชนิดอื่นๆ

ลักษณะที่พึงประสงค์ของวัสดุเสียดทาน ได้แก่

- มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ในช่วงอุณหภูมิ และความเร็วที่กว้าง
- ทนอุณหภูมิสูง
- มีความแข็งแรงสูง
- มีอัตราการสึกค่าทั้งวัสดุเสียดทานและผิวโลหะ

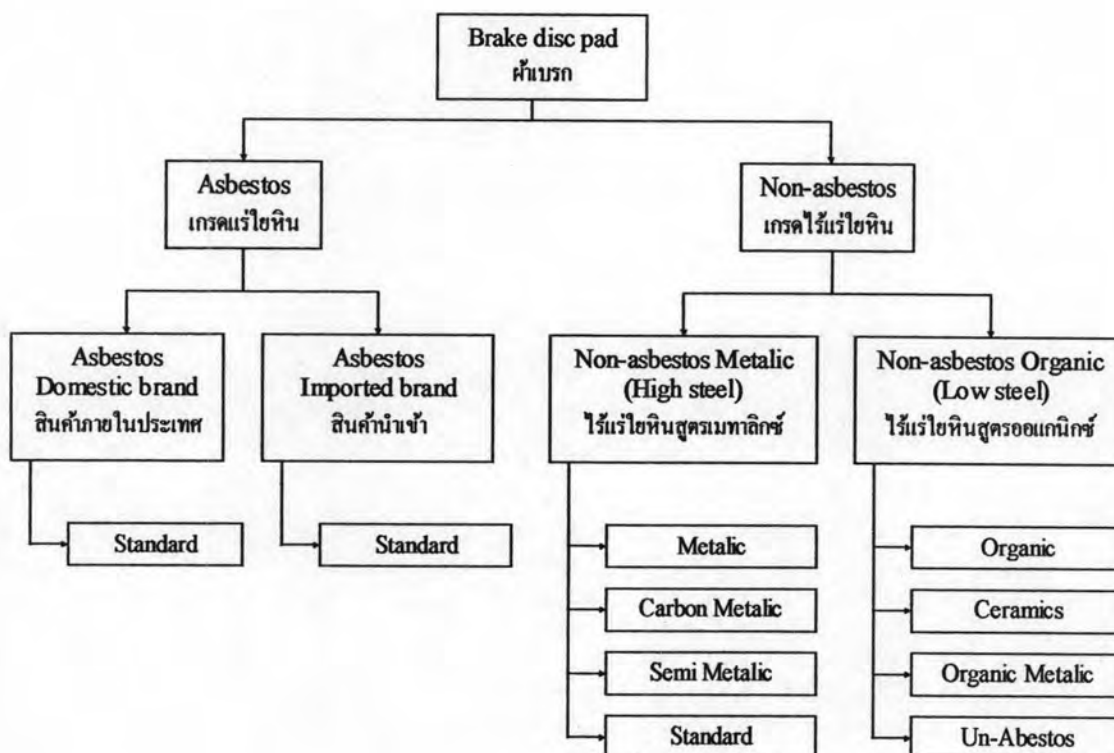
- ทนต่อน้ำมันและน้ำ
- ให้ความรู้สึกสบาย และตอบสนองในการเบรก ไม่มี NVH (Noise Vibration Harshness)
- มีปริมาณฝุ่นต่ำ

2.1.7 ประเภทของผ้าเบรก

การแบ่งประเภทของผ้าเบรก ใช้เกณฑ์แบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต และแบ่งตามประเภทการใช้งาน ดังนี้

i. ผ้าเบรกแบ่งตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต

ผ้าเบรกในตลาดค้าปลีกไทย สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือแบบใยหินและแบบไร้ใยหิน โดยแบบใยหินแยกออกเป็น 2 ชนิด โดยชนิดแรกเป็นแบบใยหินซึ่งเป็นสินค้าภายในประเทศและเป็นสินค้านำเข้าตามมาตรฐาน ส่วนแบบไร้ใยหินแยกออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบไร้ใยหินสูตรเมทัลลิกซ์ ได้แก่ Metallic, Carbon Metallic, Semi Metallic, Standard และแบบไร้ใยหินสูตรออร์แกนิกซ์ ได้แก่ Organic, Ceramics, Organic Metallic, Un-Asbestos ดังแสดงในรูปที่ 2.10



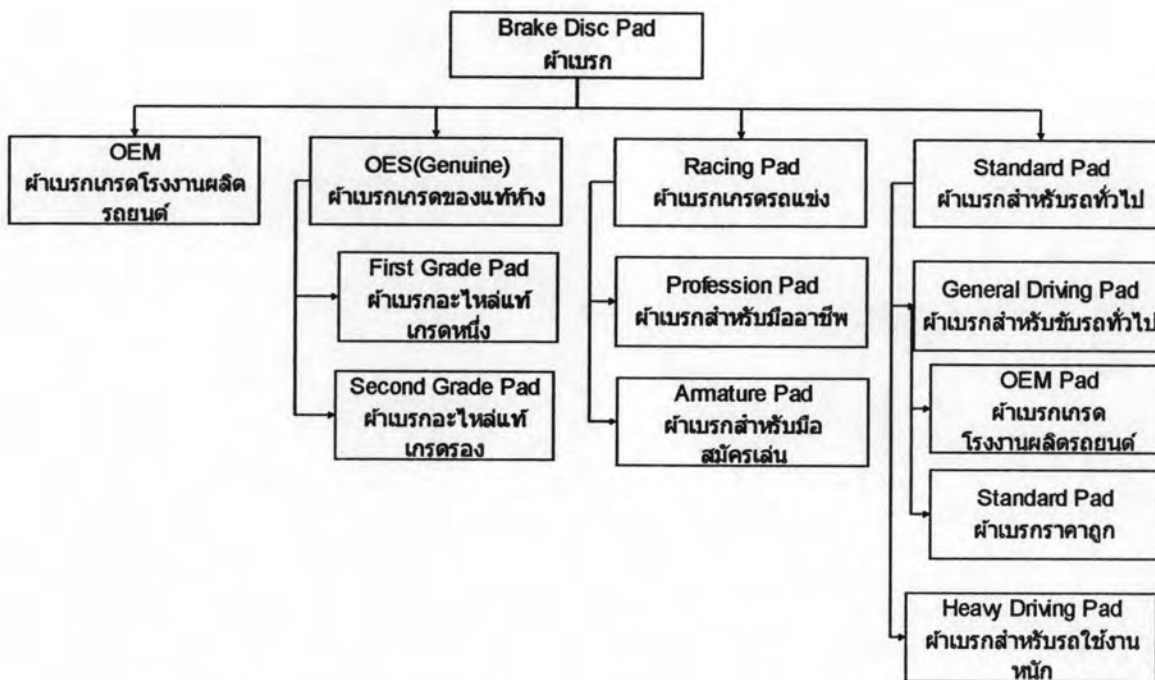
รูปที่ 2.10 การแบ่งผ้าเบรกตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตในตลาดค้าปลีกผ้าเบรกของประเทศไทย ซึ่งยังมีการใช้ผ้าเบรกแบบมีใยหินอยู่ [8]

ii. ผ้าเบรกแบ่งตามการใช้งาน

ผ้าเบรกรถยนต์ มีหลากหลายเกรด แต่ละโรงงาน มีมาตรฐานที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับนโยบายและทิศทางการทำธุรกิจของโรงงานนั้น ผู้ผลิตผ้าเบรกรถยนต์มี 2 ประเภท คือ ผู้ผลิตสำหรับค้าปลีกโดยเฉพาะ และ ผู้ผลิตสำหรับอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ (Original Equipment Manufacturer, OEM)

ผู้ผลิตผ้าเบรกสำหรับค้าปลีก มักผลิตผ้าเบรกหลากหลายเกรด หลายคุณภาพ และหลากหลายราคาออกสู่ตลาด บางผู้ผลิตอาจผลิตผ้าเบรกโดยบรรจุภายใต้หลากหลายยี่ห้อ เพื่อให้ตรงตามความต้องการของผู้จำหน่ายและผู้ใช้รถมากที่สุด ผู้ผลิตกลุ่มนี้จะเน้นราคาเป็นหลักในการทำตลาด กลุ่มเป้าหมายจะเป็นลูกค้าปลีกทั่วไป ผลิตภัณฑ์ที่นำออกจำหน่ายจะอยู่ตั้งแต่กลุ่มตลาดล่าง จนถึงกลุ่มตลาดกลาง

ผู้ผลิตผ้าเบรกสำหรับอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ (OEM) เน้นผลิตผ้าเบรกเกรด OEM ผู้ผลิตมุ่งเน้นคุณภาพตามมาตรฐานอะไหล่สำหรับรถยนต์ใหม่ กลุ่มเป้าหมายจะเป็นโรงงานผลิตรถยนต์รวมทั้งศูนย์บริการรถยนต์ชั้นนำ (Order Execution Services, OES) ผ้าเบรกที่จำหน่ายในตลาดค้าปลีก จะอยู่ในกลุ่มตลาดบนหรือตลาดพรีเมียมเท่านั้น แผนภาพแสดงการแบ่งผ้าเบรกตามการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การแบ่งผ้าเบรกตามการใช้งาน [8]

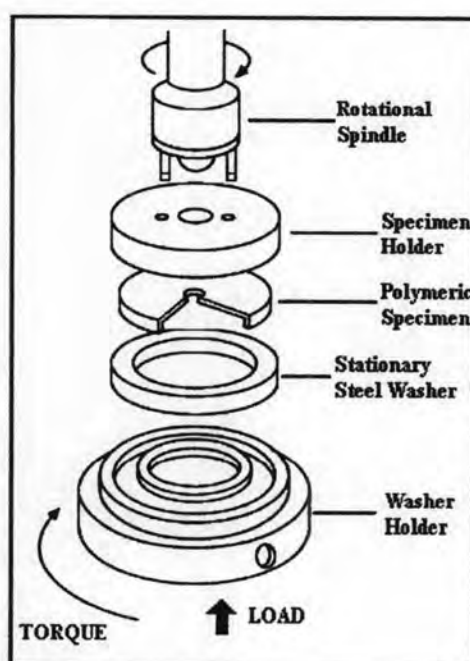


2.2 การศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของผ้าเบรก

2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

i. การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction testing)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction testing, COF) ของวัสดุกระทำได้โดยให้ผิวหน้าของคู่วัสดุที่ต้องการทดสอบเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามเพื่อให้เสียดสีหรือถูกัน ในกรณีของผ้าเบรกเป็นการเคลื่อนถูกันระหว่างผ้าเบรกและจานเบรก โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้ คือ อัตราส่วนของแรงที่ใส่เข้าไปเพื่อให้วัสดุเกิดการเคลื่อนที่หารด้วยแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ถ้าวัสดุใดมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำแสดงว่าวัสดุดังกล่าวมีพื้นผิวที่ลื่น โดยทั่วไปในการทดสอบชิ้นงานพอลิเมอร์จะกระทำการทดสอบในสภาพชื้นทดสอบที่แห้งปราศจากการเค็มสารหล่อลื่นเทียบกับงานโลหะที่ขัดมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงการจำลองแนวคิดการทดสอบ โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้จากการทดสอบจะขึ้นกับตัวแปรสองประการ ได้แก่ แรงที่ใส่เข้าไปในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของวัสดุ และความเร็วของการเคลื่อนที่ของวัสดุทดสอบ นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานยังเป็นฟังก์ชันกับพื้นผิวของวัสดุทดสอบและพื้นผิวของงานทดสอบที่อยู่กับที่อีกด้วย [9]

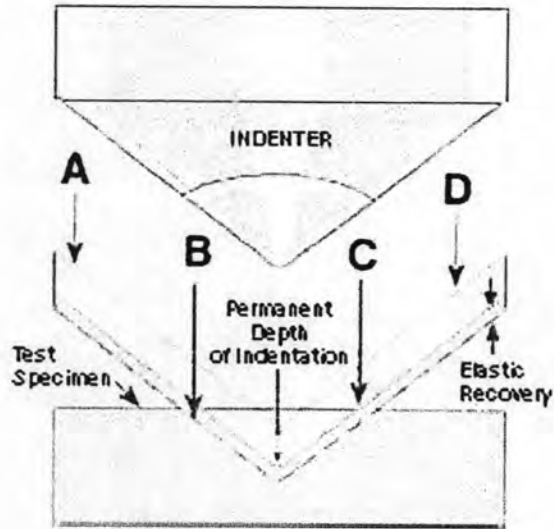


รูปที่ 2.12 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุพอลิเมอร์ [9]

ii. การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

ความแข็งเป็นสมบัติในการต้านทานแรงทางกลที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหรือขนาดอย่างถาวร (Plastic deformation) การทดสอบความแข็งที่ใช้อยู่ในปัจจุบันอาจจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกด (Static indentation test) การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกระแทกแบบสะท้อน (Dynamics หรือ Rebound hardness test) และการทดสอบความแข็งด้วยการชุบสี (Starch test) การทดสอบโดยใช้หัวกดเป็นการทดสอบที่นิยมมากที่สุด ในทางวัสดุและโลหะวิทยา [10] การทดสอบโดยใช้หัวกดสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness testing) การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell hardness testing) และการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness testing) หลักการทดสอบ อาศัยแรงกดที่ทราบค่ากดลงบนหัวกดมาตรฐาน ซึ่งหัวกดนี้จะจมไปในชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell ถูกพัฒนาเพื่อทดแทนการทดสอบแบบอื่นๆ ซึ่งมีข้อจำกัดหลายด้าน การทดสอบความแข็งแบบ Rockwell จะตัดลึนค่าความแข็งจากระยะที่หัวกดจมลึกลงไปในผิวงาน สำหรับวัสดุที่แข็งหัวกดจะจมลงไปได้น้อย สำหรับวัสดุอ่อนหัวกดจะจมลงไปได้มาก หลักการทดสอบนี้ช่วยลดขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานและการตรวจสอบพื้นที่รอยกด อย่างไรก็ตามการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell มีจุดอ่อนตรงที่ระยะการจมลึกของหัวกดไม่ได้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความแข็ง การทดสอบมักจะมีปัญหาเมื่อนำวัสดุที่อ่อนหรือแข็งเกินไปมาทดสอบ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้แบ่งการทดสอบออกเป็นการทดสอบย่อย เรียกว่า Scale การทดสอบแต่ละ Scale จะกำหนดรูปทรงลักษณะของหัวกดและน้ำหนักกดแตกต่างกันไปตามแต่ละ Scale การทดสอบผ้าเบรกจะกระทำที่ Scale M, R และ S ขึ้นอยู่กับชิ้นทดสอบว่าค่าความแข็งจะตกอยู่ใน Scale ไດจึงจะให้ค่าอยู่ในช่วง 50-115 ตามมาตรฐานการทดสอบ JIS D 4421



รูปที่ 2.13 แบบจำลองการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ [11]

iii. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity testing)

ความถ่วงจำเพาะเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ได้จากการหาอัตราส่วนของความหนาแน่นของวัสดุเทียบกับความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4°C (39°F) ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวนี้ น้ำจะมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด เท่ากับ 1.00 g/ml. หรือ 1000 kg/m³ (6.24 lb/ft³) ค่าความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย ค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปจะถือว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเกือบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุมีอุณหภูมิเข้าใกล้จุดอ่อนตัว (Softening) หรือจุดหลอมเหลว (Melting point) ความถ่วงจำเพาะจะมีค่าต่างไปจากเดิม การทราบค่าความจำเพาะของวัสดุมีประโยชน์ 2 ประการ ได้แก่ รู้ถึงน้ำหนักหรือปริมาตรของชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปเรียบร้อยแล้ว ชิ้นส่วนที่องค์ประกอบมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อย การที่จะเพิ่มน้ำหนักของวัสดุให้เพิ่มมากขึ้นหมายถึงจะต้องเพิ่มองค์ประกอบต่างๆ เข้าไปในสูตรผสมของเรซินมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการจัดซื้อวัตถุดิบว่าจะได้เนื้อของวัตถุดิบจริงๆ เท่าใด เทียบต่อหน่วยลูกบาศก์เมตร [12, 13]

iv. การทดสอบความพรุน (Porosity testing)

การทดสอบความพรุนเป็นการวัดช่องว่างเล็กที่เกิดขึ้นหรือมีอยู่ในเนื้อวัสดุทั้งภายในและที่ผิวหน้า โดยทั่วไปจะรายงานในลักษณะที่เป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์รูพรุนทั้งหมดที่มีอยู่ต่อปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ

ในทางอุตสาหกรรมพลาสติกหรือโลหะ ความพรุนในวัสดุคืบมีผลอย่างรุนแรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ รูพรุนที่เกิดขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากปัญหาการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการผลิต ปัญหาจากสิ่งเจือปนในวัสดุคืบและอาจมาจากปัญหาการหล่อขึ้นรูปชิ้นงาน รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในอาจจะกลายเป็นรูพรุนบริเวณที่ผิวของวัสดุได้จากขั้นตอนในการผลิตที่ต้องมีการขัด การกลึง การไส และการตัด ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการไม่สามารถตรวจวัดหรือได้ค่าที่ไม่ถูกต้องของความพรุนของวัสดุจะทำให้ชิ้นงานที่ได้สูญเสียประสิทธิภาพในการทำงาน หรือเกิดปัญหาการเจือปนในวัสดุหรือชิ้นงานระหว่างการทำการผลิตซึ่งเป็นเหตุให้ชิ้นงานหรือวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพหรือคุณสมบัติไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้ รูพรุนที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะ พลาสติกหรือวัสดุคอมโพสิตมีผลกระทบเป็นอย่างยิ่งต่อรูปร่าง ความตึงเครียด และคุณสมบัติที่ผิวหน้าของวัสดุ

วิธีการตรวจวัดความพรุน มีด้วยกันหลายวิธีดังนี้[14]

- a. การหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรและความหนาแน่น เป็นวิธีการที่รวดเร็วและมีความแม่นยำพอสมควร (ความคลาดเคลื่อน 2%)
- b. การทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำหรือน้ำมัน (Water/oil saturation method) เป็นวิธีการที่ยู่ยากแต่ค่าที่ได้ที่ความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงมาก
- c. การระเหยของน้ำ (Water evaporation method) เป็นวิธีการที่ยู่ยากมากที่สุดแต่ค่าที่ได้ที่ความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงที่สุด
- d. Mercury intrusion porosimetry เป็นการใส่ปรอทเหลวคลุมให้ทั่วพื้นผิวแล้วใช้ความดันทำให้ปรอทเหลวเข้าไปในรูพรุน ปริมาณความดันที่ใช้ตัวเป็นสัดส่วนกับปริมาณรูพรุน เป็นวิธีการหาความพรุนในถ่านหินและเส้นใย
- e. การดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas adsorption) เป็นวิธีการหาความพรุนในถ่านหินซึ่งสามารถวัดความพรุนได้ทั้งจากน้ำหนักและปริมาตร

2.2.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

i. การทดสอบการต้านแรงเฉือน (Shear strength testing)

สมบัติการต้านแรงเฉือน เป็นการทดสอบความสามารถของวัสดุในการรับภาระหรือแรงที่กระทำ โดยมีทิศทางขนานกับการเคลื่อนที่เกิดขึ้นหรือทิศทางขนานกับระนาบของความเข้มที่เกิดขึ้นในวัสดุ เพื่อตรวจสอบความสามารถของวัสดุในการต้านทานการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหรือรูปร่างอย่างถาวรหรือการหลุดเลื่อนของชั้นของวัสดุ [15] หลักการในการทดสอบจะใช้น้ำหนักหรือแรงในอัตราที่คงที่บริเวณขอบของวัสดุในด้านตรงกันข้ามกัน และมีทิศทางของแรงขนานกับทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุในสภาพการทดสอบปกติ มาตรฐานสำหรับทดสอบการต้านทานแรงเฉือนที่นิยมในการทดสอบสำหรับผ้าเบรกรถยนต์ได้แก่ JIS D4415, ISO 6311 และ ASTM D732

ii. การทดสอบการทนต่อแรงกระแทก (Impact testing)

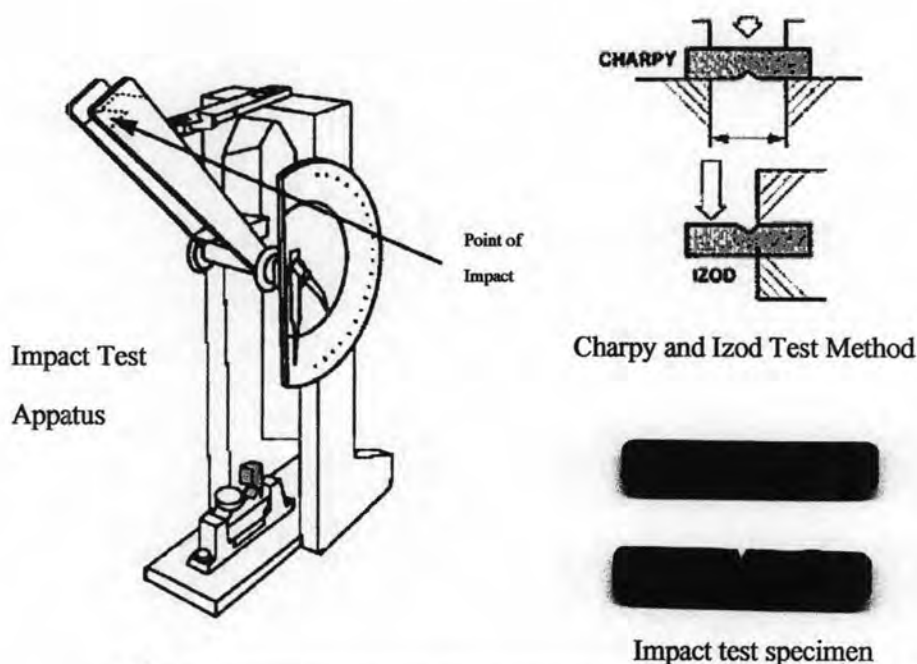
สมบัติการทนต่อแรงกระแทก เป็นความต้านทานของวัสดุต่อแรงกระแทกที่มากกระทำในทันที (ในช่วงเวลาสั้น ๆ) ผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปของความสามารถในการดูดซับแรงหรือพลังงานที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานจลน์ของมวลที่เคลื่อนที่ไปยังชิ้นงานทดสอบ สมบัติการทนต่อแรงกระแทกนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเหนียวทนทานของพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด [10] พอลิเมอร์ที่มีความเหนียวทนทานมากจะสามารถดูดซับพลังงานในการกระแทกได้มาก การทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่นิยมใช้มีดังนี้

a. Pendulum impact test

เป็นการทดสอบที่ง่ายและนิยมมากที่สุด ทดสอบ โดยการปล่อยค้อนลูกตุ้มให้ตกลงมากระแทกกับชิ้นงาน แล้ววัดค่าพลังงานจลน์ที่ลูกตุ้มกระแทกกับชิ้นงาน วิธีการทดสอบที่นิยมมี 2 วิธี ได้แก่ การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบ Charpy (Charpy Impact Test) และ การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบ Izod (Izod Impact Test) ลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14

การทดสอบของทั้ง 2 วิธีนี้คล้ายกันคือ วางชิ้นงานทดสอบไว้เพื่อรับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของค้อนน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกชิ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่

ลูกค้อนมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกค้อนกระทบชิ้นทดสอบ ลูกค้อนจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูล ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวนอน และให้ลูกค้อนตกกระทบบนที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกค้อนกระทบบนที่ด้านที่มีรอยบาก ชิ้นทดสอบเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูถั่ว ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้ มาตรฐานที่เป็นที่นิยมในการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกได้แก่ ASTM D 256 และ ASTM D 6110 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบการทนต่อการกระแทกแบบ Izod และ Charpy ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [10]

b. Falling-weight impact test or Drop Impact Test

เป็นการทดสอบโดยการทิ้งก้อนน้ำหนัก เช่น ลูกบอล ลงบนชิ้นงาน พลังงานที่ใช้ในการทำให้ชิ้นงานแตกหักหาค่าได้จาก ผลคูณของน้ำหนักของบอล กับความสูงในการทิ้งลูกบอล วิธีการนี้มีข้อดีเหนือวิธี Pendulum Impact Test คือ มีการประมวลผลของการเกิดความเค้นจากการ

กระแทก (Impact Stress) ในหลายทิศทางเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้วัดความเหนียวทนทานโดยรวมของวัสดุได้ และสามารถใช้ทดสอบชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันได้ เช่น ชิ้นงานที่เป็นฟิล์ม ชิ้นงานแผ่นแบนเรียบ หรือชิ้นงานที่เป็นท่อและข้อต่อ

iii. การทดสอบการทนต่อการโค้งงอ (Flexural strength testing)

สมบัติการทนต่อการโค้งงอ เป็นสมบัติที่แสดงความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงที่มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับความยาวของชิ้นงาน โดยแรงที่กระทำนั้นเป็นผลเนื่องมาจากความเค้นของแรงกด (Compressive stress) และความเค้นของแรงดึง (Tensile stress) ที่เกิดขึ้นในขณะเดียวกัน [16] โดยทั่วไปสมบัติในการทนต่อการโค้งงอนี้จะแสดงในรูปของ Maximum flexural strength ซึ่งเกิดขึ้นที่ผิวนอกของชิ้นงานเมื่อเริ่มการแตกหัก กรณีที่พอลิเมอร์ไม่มีการแตกหักขณะที่มีการโค้งงอก็จะแสดงในรูปของค่า Flexural yield strength ที่ค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ผิวนอกเข้าใกล้ 5% มาตรฐานการทดสอบที่นิยมใช้คือ ASTM D 790

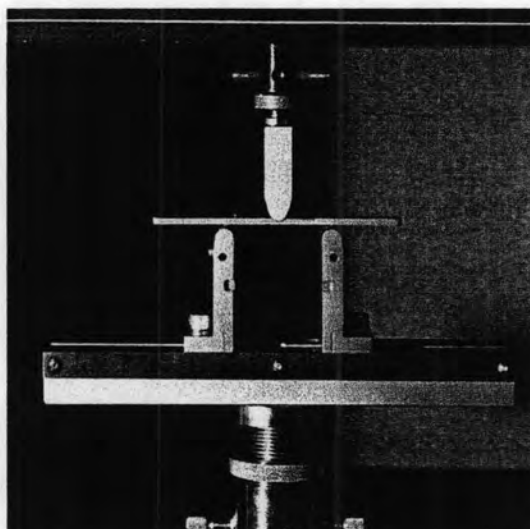
วิธีทดสอบสมบัติการทนต่อการโค้งงอ โดยทั่วไปมี 2 วิธีคือ

a. วิธีใส่แรงกระทำ 3 จุด (Three-point Bending)

เป็นการใส่แรงกดตรงกึ่งกลางระหว่างจุดรองรับ 2 จุด ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณแนวตั้งฉากที่จุดกด ดังแสดงในรูปที่ 2.15

b. วิธีใส่แรงกระทำ 4 จุด (Four-point Bending)

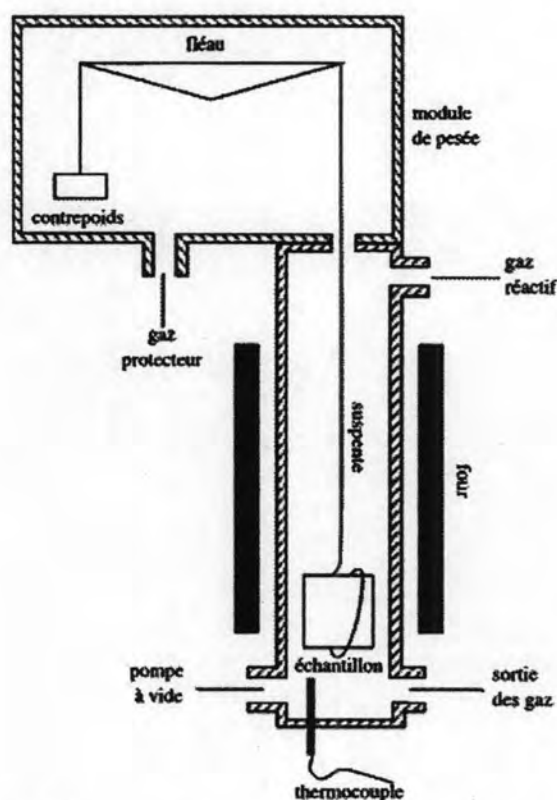
เป็นการใส่แรงกด 2 จุด ระหว่างจุดรองรับ 2 จุด ระยะห่างระหว่างแต่ละจุดเป็น 1 ใน 3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับ ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณแนวตั้งฉากที่จุดกด วิธีนี้ความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นระหว่างจุดกด 2 จุด ซึ่งเหมาะกับการทดสอบชิ้นงานที่ไม่สามารถทำให้แตกหักได้ด้วยวิธีการใส่แรงกระทำ 3 จุด



รูปที่ 2.15 การทดสอบการทนต่อการดัดโค้ง

2.2.3 การศึกษาการเสื่อมสลายเมื่อร้อนโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

TGA เป็นเทคนิคเพื่อหาความเสถียรของวัสดุที่ทดสอบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำได้โดยการวัดมวลของวัสดุที่หายไปที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่โปรแกรมเวลาหรืออุณหภูมิไว้ ในการทดสอบจะนำวัสดุที่ต้องการทดสอบใส่ลงในเตาเผาซึ่งมีแขนต่อเข้ากับเครื่องชั่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จากนั้นเครื่องจะบันทึกน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมวลเป็นผลจากการแตก (Rupture) การเกิดพันธะเคมี [17] โดย TGA ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุ ผลของความร้อนที่มีต่อวัสดุ นอกจากนี้ยังใช้คำนวณหาจีเอ็มเมื่อมีปฏิกิริยากับก๊าซที่ใช้ Purge หรืออาจหาปริมาณสารเติมแต่งในพอลิเมอร์หรือสารประกอบ



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการทำงานของ TGA [18]

2.2.4 การศึกษาโครงสร้างของผ้าเบรกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning Electron Microscope, SEM)

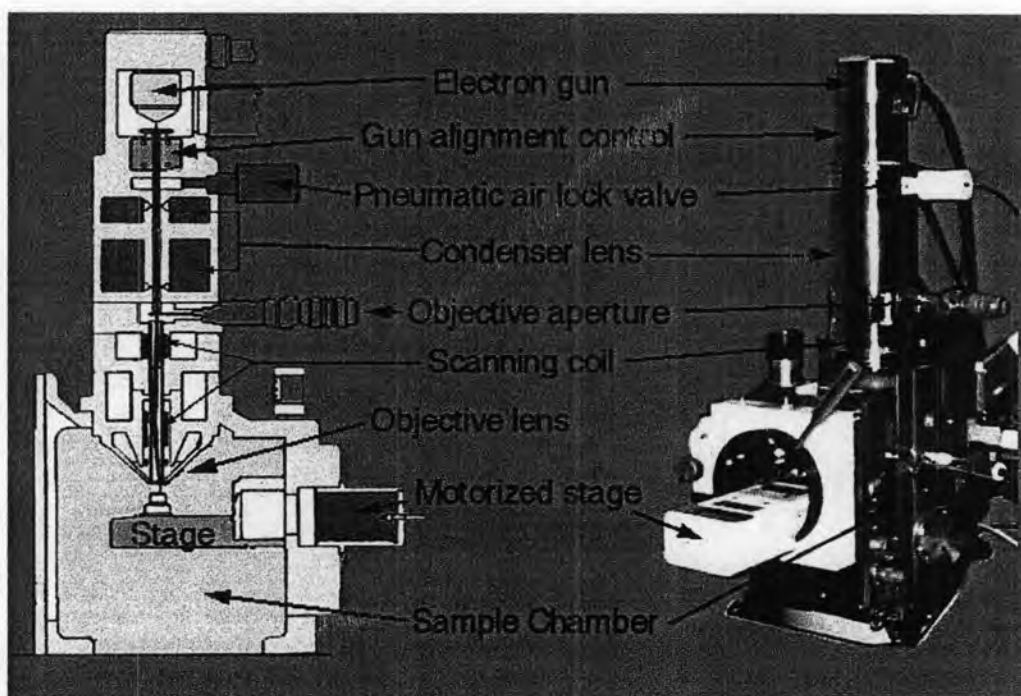
i กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นกล้องที่ใช้ส่องดูวัตถุขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นใหญ่ขึ้นได้กว่าเดิมถึงสองแสนเท่า กล้องชนิดนี้ใช้อิเล็กตรอนแทนแสง โดยใช้อำนาจแม่เหล็ก ไฟฟ้าบังคับกระแสนี้ให้พุ่งไปรวมกันที่จุดใดจุดหนึ่งบนตัวอย่าง ในทำนองเดียวกับการใช้เลนส์รวมแสงไปที่จุดโฟกัสในกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา ซึ่งภาพที่ได้จะเกิดขึ้นบนจอมอนิเตอร์โดยสามารถที่จะเลือกบริเวณที่จะดูได้อย่างสะดวก โดยระบบของ เครื่องจะอยู่ในสภาพสุญญากาศ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นประโยชน์มากในการศึกษาค้นคว้าทางการแพทย์ โลหะวิทยา และวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขา เพราะใช้ส่องให้มองเห็นรูปร่าง ลักษณะของแบคทีเรีย ไวรัส และผลึกที่ประกอบขึ้นเป็น โลหะซึ่งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาได้

ii หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ด้านบนจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (Primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ (High voltage) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 17 และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบบนชิ้นงานจะ ได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (Secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (Backscattered electron) หรือ x-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดย detector แต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด จากรูปที่ 2.17 แสดงถึงระบบกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบสแกน โดยเริ่มตั้งแต่แหล่งกำเนิดพลังงานอิเล็กตรอน (Electron Gun) ตัวควบคุมตำแหน่งปืนอิเล็กตรอน ระบบเลนส์ (Condenser Lens, Objective Lens) สัญญาณภาพ ต่างๆ (Signal Images) ตลอดจนหัวค้ำจับสัญญาณต่างๆ (Signal Detectors) ที่ให้ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด [19]

iii กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

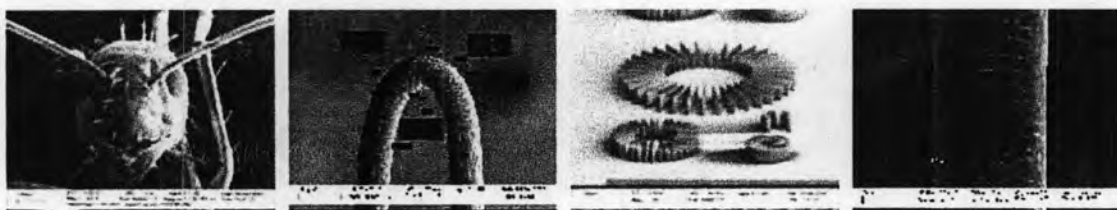
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สามารถแบ่งระบบการทำงานออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- a. High vacuum mode ระบบภายใน Column, Specimen chamber จะมีความเป็นสุญญากาศสูงประมาณ $10e^{-5}$ - $10e^{-6}$ mBar
- b. Variable Pressure mode ระบบภายใน Column จะมีความเป็นสุญญากาศสูง แต่ภายใน Specimen chamber จะสามารถปรับแรงดันสุญญากาศได้ตั้งแต่ 1- 400 Pa

iv การวิเคราะห์สำหรับเครื่อง SEM

สามารถวิเคราะห์ได้ 2 ลักษณะ คือ

- a. การดูลักษณะของพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งสามารถดูความแตกต่างของพื้นผิวโดยขึ้นอยู่กับลักษณะของ Detector ได้ โดยแบ่งเป็น
 - ภาพที่ได้จากสัญญาณ secondary electron จะได้ภาพที่เป็นลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่มีความสูงต่ำ ขรุขระ ที่เกิดขึ้นจริงบนตัวอย่าง และสามารถวัดขนาดต่างๆ บนตัวอย่างนั้น ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพที่ได้จากสัญญาณ secondary electron [20]

- ภาพที่ได้จากสัญญาณ backscattered electron จะได้ภาพที่เป็นลักษณะเป็นภาพพื้นผิวของวัตถุ แต่ให้ความแตกต่างบนพื้นผิวของวัตถุในลักษณะแบ่งเป็นเฟสสว่างและเฟสมืด ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของธาตุ (Z) ที่ผสมอยู่ในวัตถุนั้น ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงกว่าจะมีเฟสที่สว่างกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำกว่า



รูปที่ 2.19 การแสดงภาพที่ได้จากสัญญาณ backscattered electron [20]

- b. การวิเคราะห์ธาตุสามารถให้ข้อมูลได้เป็น 2 ลักษณะ คือ หาธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างว่ามีธาตุใดบ้าง โดยแสดงออกมาเป็นกราฟ และบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุนั้นๆ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yun Cheol Kim และคณะ [21] ศึกษาผลกระทบของฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) โพแทสเซียมไททาเนต (Potassium titanate) CNSL (Cashew nut shell liquid) ต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพของผ้าเบรกสูตรไม้ใช้เส้นใยหิน ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า

- i ความแข็ง (hardness) ความพรุน (porosity) ความต้านทานแรงกด (compressibility) ของวัสดุเสียดทาน จะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารเติมแต่งทั้งสามตัว โดยที่ค่าความแข็ง (hardness) จะมีค่าลดลงอย่างเป็นเส้นตรงเมื่อค่าความพรุน (porosity) และความต้านทานแรงกด (compressibility) เพิ่มขึ้น
- ii ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของฟีนอลิกเรซินและ CNSL เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของโพแทสเซียมไททาเนตเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำลง
- iii เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานขึ้นกับปริมาณขององค์ประกอบทั้งสามอย่างสำคัญและ ค่า fade resistance สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมไททาเนตและลดปริมาณของ CNSL ลง
- iv การสึกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของฟีนอลิกเรซินเพิ่มขึ้นแต่จะลดลงเมื่อมีปริมาณของโพแทสเซียมไททาเนตและ CNSL เพิ่มขึ้น
- v แรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของฟีนอลิกเรซินจะทำให้เกิดเสียงในระหว่างการเสียดสีมากขึ้นและเสียงดังกล่าวจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของโพแทสเซียมไททาเนตและ CNSL

Daishuang Li และคณะ [22] ศึกษาการเตรียมผงยางสไตรีนบิวตะไดอินอนุภาคขนาดนาโนโดยการฉายรังสีแกมมาลงในน้ำยางสไตรีนเพื่อทำให้เกิด crosslink เพิ่มขึ้นแล้วตามด้วยการพ่นแห้งเพื่อให้ได้ผงยางนาโน โดยมีโมโนเมอร์ 2-เอธิลเฮกซิลอะครีเลต (2-ethyl hexyl acrylate; 2-EHA) และ ไตรเมทิลโพรเพนไตรอะครีเลต (Trimethylolpropane triacrylate, TMPTA) ทำหน้าที่เป็น crosslinking agent จากการศึกษาพบว่าทั้ง 2-EHA และ TMPTA สามารถช่วยเพิ่มการเกิด crosslink ในน้ำยาง SBR ได้เป็นอย่างดี เมื่อศึกษาด้วย SEM และ TEM พบว่าขนาดของอนุภาค

ยางนาโนที่ได้จะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของยางในน้ำยาง เมื่อนำยางสไตรีนอนุภาคขนาดนาโนที่ผลิตได้มาเติมลงในพอลีสไตรีน (PS) และพอลีสไตรีนทนแรงกระแทกสูง (HIPS) พบว่าสมบัติเชิงกล (tensile strength, notched Izod impact strength and elongation at brake point) ของ PS และ HIPS มีค่าสูงขึ้น

Hinchiranan และคณะ [23] ศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นอะครีลิกที่มีการเติมยางธรรมชาติ ซึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) ของเมธิลเมธาไครเลต (Methyl methacrylate) และสไตรีน (Styrene) ในน้ำยางธรรมชาติ โดยมีโพแทสเซียม เปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate) เป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าสมบัติเชิงกล (tensile strength and Charpy impact strength) ของแผ่นอะครีลิกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ graft natural rubber เพิ่มขึ้น สำหรับ elongation at break point ก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อมีปริมาณของยางเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแผ่นอะครีลิกซึ่งมีสมบัติเป็นวัสดุแบบเปราะ ได้เริ่มมีสมบัติแบบยืดหยุ่นได้ สำหรับค่าความแข็ง (hardness) เมื่อมีปริมาณของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจะทำให้มีค่าลดลง เมื่อศึกษารอยหักของแผ่นอะครีลิกที่มีการเติมยางลงไปด้วย SEM พบว่าบริเวณรอยหักของแผ่นอะครีลิกที่มีการเติมยางธรรมชาติลงไปมีลักษณะเรียบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่เติมลงไปทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มการเกิดอันตรกิริยาให้ดีขึ้นและยังทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานที่มากกระทบ ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

Cevdet Kaynak และคณะ [24] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟีนอลิกฟอร์มอลดีไฮด์เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) โดยการนำฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin) มาปรับปรุงสมบัติด้วยการเติมยางอะซิโตนไครล์บิวตะไดอีน (acrylonitrile butadiene rubber) เพียงอย่างเดียว และการเติมยางไนไตรล์ผสมกับ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซิซิลาน (3-aminopropyl triethoxysilane) ซึ่งตัวอย่างที่ไรท์ทดสอบได้จากการผสมแต่ละส่วนเข้าด้วยกันและหล่อขึ้นรูป โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นฟีนอลิกเรซินบริสุทธิ์ กลุ่มที่สอง ฟีนอลิกเรซินที่มีการเติมยางไนไตรล์ในอัตราส่วน 0.5, 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนัก และกลุ่มสุดท้ายเป็นฟีนอลิกเรซินที่มีการเติมยางไนไตรล์ 0.5% โดยน้ำหนัก ผสมด้วยอะมิโนซิลาน ในอัตราส่วน 1, 2 และ 4% โดยน้ำหนัก ซึ่งงานทั้งหมดที่ได้ทำการบ่มด้วยความร้อนในเตาอบ

ผู้วิจัยพบปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมขึ้นตัวอย่างเพื่อการทดสอบ คือ

- i. การจะลดโมโครรอยด์ที่เกิดขึ้นต้องใช้อุณหภูมิในการบ่มที่ต่ำกว่า 100°C ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการบ่มยาวนานมาก

- ii. ไม่สามารถเติมยางไนไตรล์ในอัตราส่วนสูงได้เนื่องจากจะเป็นการเพิ่มความหนืดให้กับสารผสมทำให้กวนผสมให้เข้ากันได้ยาก ซึ่งจะทำให้เกิดอนุภาคของยางไนไตรล์ที่ไม่ละลายในส่วนผสม

ชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ถูกนำมาทดสอบ Three-point bending, Charpy impact, Plain-strain fracture toughness และ Dynamic mechanical analysis ตามมาตรฐาน ISO และศึกษาโครงสร้างโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ผลสรุปดังนี้

- i. Flexural strength ของฟีนอลิกเรซินลดลงเมื่อมีการเติมยางไนไตรล์ลงไป เนื่องจากฟีนอลิกเรซินและยางไนไตรล์ต่างมีสมบัติเป็น elastomeric และปัญหาที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ แต่เมื่อมีการเติมยางไนไตรล์ผสมด้วยอะมิโนไซเลนลงไป พบว่า flexural strength มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 25%
- ii. Charpy impact strength ของฟีนอลิกเรซินเพิ่มขึ้นถึง 56% เมื่อมีการเติมยางไนไตรล์และเพิ่มขึ้นถึง 63% เมื่อเติมยางไนไตรล์ผสมกับอะมิโนไซเลน
- iii. Fracture toughness ของฟีนอลิกเรซินเพิ่มขึ้น 20% เมื่อมีการเติมยางไนไตรล์และเพิ่มขึ้นถึง 50% เมื่อเติมยางไนไตรล์ผสมกับอะมิโนไซเลน
- iv. ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า Nitrile rubber domain และ Amino silane domain มีรูปร่างเป็นทรงกลมและมีการกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบในเนื้อสารผสม นอกจากนี้กลไกของ Rubber toughening คือ Shear yielding ซึ่งสังเกตได้จาก Deformation line ที่เกิดขึ้นในเนื้อสาร
- v. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตแสดงให้เห็นว่าฟีนอลิกเรซินมีค่า glass transition temperature และ storage modulus เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหลังจากมีการเติมด้วยยางไนไตรล์หรือยางไนไตรล์ผสมกับอะมิโนไซเลน

Qingguo Wang และคณะ [25] ศึกษาสมบัติของสารประกอบพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ที่มีการปรับปรุงโดยการเติมยางนาโน (NBR-UFPR) และผงแคลเซียมคาร์บอเนตอนุภาคนาโน (UNCCs) ผลที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (T_g) ของ PVC ที่มีการเติมผงยางนาโนและผงแคลเซียมขนาดนาโนมีค่า T_g เพิ่มมากที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวของ NBR-UFPR และ UNCCs ขัดขวางความว่องไว (mobility) ของโมเลกุล PVC เมื่อได้รับพลังงานความร้อนทำให้ค่าความ

ด้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมยางนาโนเพียงอย่างเดียวค่า T_g เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ neat PVC เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง UFPR และพลาสติกเมทริกซ์ พิจารณาสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติม NBR-UFPR และ NBR-UFPR/UNCCs พบว่าค่าความเหนียว (Toughness) ค่าการทนต่อแรงกระแทกของ PVC มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการยับยั้งการขยายรอยแตกไม่ให้เกิดไปเป็นรอยแตก (cracks) และเมื่อมีการเติม UNCCs ลงไป กลไกดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจาก UNCCs ทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคสั้นลง ดังนั้นการขยายตัวของรอยแตกจึงลดลง

Hengyi Maa และคณะ [26] ศึกษาฟีนอลิกเรซินที่ถูกปรับแต่งด้วยการเติมยางไนไตรล์บิวตะไดอิน (nitrile butadiene rubber) และยางคาร์บอกซีลิกไนไตรล์บิวตะไดอิน (carboxylic nitrile butadiene rubber) อนุภาคขนาดนาโน พบว่ามีสมบัติเชิงกล (impact strength, flexural strength) และการต้านทานความร้อนดีขึ้น ภาพที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่ายางสังเคราะห์ขนาดนาโนได้มีการกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบในช่องว่างของเนื้อฟีนอลิก ซึ่งมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 100 นาโนเมตร นอกจากนี้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยังแสดงให้เห็นถึงการเกิดรอยแตกระดับนาโน (microcracks) จำนวนมากบริเวณผิว รอยแตกระดับนาโนนี้ช่วยในการกระจายพลังงานจากการกระแทกและเพิ่มประสิทธิภาพของการถูกอัดของสารประกอบฟีนอลิกอีกด้วย การวิเคราะห์ด้วย FTIR และ curing reaction kinetics ยังช่วยยืนยันว่าสารประกอบฟีนอลิกมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นจากการเกิดพันธะเชื่อม โยงระหว่างพื้นผิวของอนุภาคขนาดนาโนและฟีนอลิกเมทริกซ์ (phenolic matrix) และการมีพื้นที่ผิวมากเนื่องจากอนุภาคขนาดนาโน ปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวป้องกันมิให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเสื่อมสลายของโครงสร้างตาข่ายของฟีนอลิกเมื่อถูกให้ความร้อน

Wang Qingguo และคณะ [27] ศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบ PVC ที่เติมด้วยผงยาง ultrafine full-vulcanized NBR ที่มีขนาดอนุภาค 150 นาโนเมตร (NBR-UFPR-1) และขนาด 90 นาโนเมตร (NBR-UFPR-2) จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าอุณหภูมิแปรสภาพแก้ว (glass transition temperature) ของสารประกอบ PVC เพิ่มขึ้นจาก 77.5°C เป็น 82.37°C สำหรับ NBR-UFPR-1 และ 85.67°C สำหรับ NBR-UFPR-2 เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคภายใน PVC matrix ที่สม่ำเสมอนี้ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคยางนาโนและ PVC matrix มีมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการศึกษาด้วย SEM และ TEM อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ยังทำให้สารประกอบพลาสติก (PVC) มีสมบัติการต้านทานความร้อนที่สูงขึ้นด้วย เมื่อทำการทดสอบความเหนียวและสมบัติการต้านการกระแทก สารประกอบ PVC ที่มีการเติมอนุภาคยางนาโนลงไปมีความสมบัติการ

ด้านการกระแทกเพิ่มขึ้นจาก 3.1 kJ/m^2 เป็น 5.2 kJ/m^2 (NBR-UFPR-1) และ 5.5 kJ/m^2 (NBR-UFPR-2) หรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกการดูดซับพลังงานที่มาจากกระแทกของอนุภาคยางที่เติมลงไป ทั้งการฉีกขาดของอนุภาคยาง การเกิดโพรงเนื่องจากอนุภาคยาง การสลายพันธะ การเกิด deformation line และการเกิดรอยแตก เหล่านี้เป็นสาเหตุของการทำให้พลาสติกมีความเหนียวที่เพิ่มขึ้น ยิ่งขนาดของอนุภาคยางนาโนมีขนาดเล็กกระยะห่างระหว่างอนุภาคยางจะสั้นลง เป็นผลให้การรอยแตก การฉีกขาด หรือ deformation line เคลื่อนที่ไปได้ระยะทางสั้นๆ เท่านั้น ซึ่งหมายถึงการมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

Cevdet Kaynak และคณะ [28] ศึกษาผลของการใช้สารกลุ่มซิลเลน (Silane) เป็น coupling agent เพื่อปรับปรุงอันตรกิริยา (interface) หรือเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของ Epoxy resin และอนุภาคยางรีไซเคิล (recycle rubber particle) ซึ่งได้จากยางรถยนต์เก่าที่ถูกทิ้ง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลกับชิ้นตัวอย่างสรุปได้ดังนี้

- i. เมื่อใช้อนุภาคยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Untreated rubber particle) ผสมใน Epoxy resin พบว่าค่า Tensile strength, Impact และ Fracture toughness ลดลง เนื่องจากการเข้ากันไม่ได้ของหมู่ Hydrophobic ของอนุภาคยางกับหมู่ Hydrophilic ในอีพอกซีเมทริกซ์ (epoxy matrix)
- ii. การใช้ Silane coupling agents เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคยาง พบว่าค่า Tensile strength และ Modulus เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นระหว่างอนุภาคยางและอีพอกซีเมทริกซ์ และการใช้ เมทิลไตรเมทอกซีซิลเลน (methyl tri methoxy silane) และ 3 อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีซิลเลน (3 amino propyl tri ethoxy silane) ให้ประสิทธิภาพสูงสุด
- iii. การใช้ Silane coupling agents เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคยางไม่มีผลในการปรับปรุงสมบัติด้าน Impact และ Fracture toughness ของ Epoxy resin แต่ยังคงทำให้ค่าดังกล่าวลดลงเล็กน้อยอีกด้วย
- iv. ผลจากการศึกษารูปแบบ โครงสร้างแสดงให้เห็นว่า Silane coupling agents (methyl tri methoxy, vinyl tri ethoxy, tri amino propyl tri ethoxy, tri methoxy silyl propyl methacrylate) ได้เพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคยางและอีพอกซีเมทริกซ์ และนอกจากนี้ยังก่อให้เกิด deformation lines ขึ้นอีกด้วย

Manli Zhang และคณะ [29] ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน โดยการเติมยางอนุภาคขนาดนาโนลงไป โดยให้มีสมบัติที่สมดุลกันระหว่าง toughness และ stiffness จากการศึกษาและทดสอบที่อุณหภูมิห้องและที่ -20°C พบว่าอนุภาคยาง (elastic nano particles) ที่เติมลงไปที่ยึดตราส่วน 5% by weight ทำให้พอลิโพรพิลีนมีค่า toughness มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า stiffness ก็ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก ยางอนุภาคขนาดนาโนที่มีขนาดเล็กสามารถกระจายตัวอยู่ในเนื้อสารได้อย่างสม่ำเสมอจนทำให้สมบัติในด้าน toughness ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยางอนุภาคขนาดนาโนดังกล่าวยังทำหน้าที่เป็น nucleation agent ช่วยลดพลังงานในการเกิดผลึกให้น้อยลงทำให้อัตราการตกผลึก (crystallization rate) จึงเกิดเร็วขึ้นและความเป็นผลึก (crystallinity) และ ความหนาแน่นของนิวเคลียส (nucleation density) เพิ่มขึ้น ทำให้พอลิโพรพิลีนที่ได้มีสมบัติที่สมดุลระหว่างค่า toughness และ stiffness

Ozturk และคณะ [30] ศึกษาสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของอีพอกซีเรซิน ไดกลีซิดิอีเธอร์ บิสฟีนอล-เอ เบส (Diglycidyl ether of bisphenol-A base epoxy resin) เมื่อมีการเติมยาง ไฮดรอกซิล เทอร์มิเนต พอลิบิวตะ ไดอิน (Hydroxyl terminated polybutadiene; HTPB) โดยใช้ไซเลนเป็นสาร coupling agent เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาของ HTPB และเมทริกซ์อีพอกซี (epoxy matrix) ผลจากการทดลองพบว่าค่า Tensile strength และ Impact toughness ของ อีพอกซีเรซินเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติม 1% HTPB และ 2% Silane coupling agents เนื่องจากยางที่เติมลงไปทำหน้าที่ช่วยดูดซับพลังงานที่เข้ามาในอีพอกซีเมทริกซ์ และยังพบว่า การเติมยางลงไปยังช่วยเพิ่มความเครียด ณ จุดขาดอีกด้วย เนื่องจากเหตุผลที่น่าจะเป็นไปได้ว่า เมื่อมีการเติม HTPB และ Silane coupling agents ลงไปจะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการยึดตัวออกทำให้ลดความหนาแน่นของการเกิด crosslinking ในเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analysis) แสดงให้เห็นว่า Storage modulus และ Glass transition temperature มีค่าลดลง และผลที่ได้จากการศึกษาด้วยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง โดเมนของยาง (Rubber domain) และ อีพอกซีเมทริกซ์ และการเกิด Deformation line และ Distorted rubber domain ขึ้นในอีพอกซีเมทริกซ์

Cevdet Kaynak และคณะ [31] ศึกษาลักษณะรอยแตกของอีพอกซีเรซิน (Epoxy resin) ที่มีการเติมผงยางลงไปเพื่อเพิ่มความเหนียว (toughness) ให้กับเรซิน การศึกษาได้ใช้วิธีการต่างๆ ในการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคยางและอีพอกซีเมทริกซ์เพื่อให้เกิดการผสานเข้ากันได้ ได้แก่ ออกซิเจนพลาสมา (Oxygen plasma), ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (Vinyltriethoxysilane), 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane), กรดอะครีลิก (acrylic acid) และ

กรดอะคริลิกผสมด้วยเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Acrylic acid/benzoylperoxide) หลังจากก็นำ ส่วนผสมต่างผสมและหล่อเข้าด้วยกัน และทำการบ่มเรียบร้อยแล้ว ขึ้นทดสอบตัวอย่างได้ถูกนำมา ทดสอบ Plain strain fracture toughness และส่องพื้นผิวบริเวณแตกหักด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ค่า Fracture toughness ของเรซินเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมยางลงไป 5% โดยปริมาตร และเมื่อส่วนผสมเป็น 25% โดยปริมาตรค่าที่ได้กับลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ส่วนผสม 5% เมื่อส่องด้วย SEM พบว่ากลไกที่ทำให้เรซินมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Toughness) เนื่องมาจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ การเกิด Crack deflection อันเนื่องมาจากการเกิดการยึดเหนี่ยวกันได้ดี ของอนุภาคยางกับอีพอกซีเมทริกซ์ และปัจจัยที่สองคือ Shear deformations และ Debonding ที่ เกิดขึ้น