

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction testing)

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรคนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของผ้าเบรกที่มีการเติมผงยางว่ามีความสามารถหยุดได้ดีเพียงใด และมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการใช้งานอย่างไร รูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ไม่มีส่วนผสมของยาง และรูปที่ 4.2 – 4.7 แสดงแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยางไมโครอัตราส่วน 1.2%, 1.4%, 1.6%, 1.8%, 2.0% และ 2.2% โดยน้ำหนักตามลำดับ รูปที่ 4.8-4.13 เป็นกราฟแสดงแรงเสียดทานของผ้าที่ผสมยางนาโนปริมาณเดียวกับยางไมโคร มาตรฐานการทดสอบ JIS D4411 ระบุพิกัดสูงสุดและต่ำสุดของแรงเสียดทาน (Upper limit และ lower limit) สำหรับผ้าเบรกที่ได้มาตรฐาน JIS D4411 โดยมีค่าแรงเสียดทานสูงสุดที่ 800 N และต่ำสุดที่ 300 N แรงเสียดทานที่ได้จากการทดสอบผ้าเบรกที่ไม่มียางและมียาง NBR ทั้งขนาดไมโครและขนาดนาโนปริมาณต่างๆ ต่างมีค่าอยู่ในช่วงพิกัดต่ำสุดและสูงสุดตามมาตรฐาน JIS D4411

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ไม่มียาง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าช่วงต้นของการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 100°C แรงเสียดทานของผ้าเบรกลักษณะคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยราว 430 N เมื่ออุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าไม่คงที่ โดยช่วงเริ่มต้นของการหมุนจวน ระดับแรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นมาก หลังจากนั้นระดับแรงเสียดทานจึงค่อยๆ ลดลงจนมีระดับใกล้เคียงที่ 100°C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200°C ระดับแรงเสียดทานที่ได้ไม่คงที่ มีการผันผวนอย่างมาก ซึ่งอาจเป็นช่วงที่ผ้าเบรกกำลังปรับตัวต่อการใช้งาน เมื่อการทดสอบมาถึงที่อุณหภูมิ 250°C ในช่วงต้น ระดับแรงเสียดทานเริ่มคงที่ โดยแรงเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 400 N เป็น 470 N หลังจากนั้นระดับแรงเสียดทานเริ่มมีระดับค่อนข้างคงที่ในช่วงท้ายของการทดสอบ จนถึงอุณหภูมิ 300°C ระดับแรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ และมีระดับเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 520 N แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 350°C ระดับแรงเสียดทานเริ่มไม่คงที่ มีความผันผวนเล็กน้อย ระดับแรงเสียดทานเฉลี่ยลดลงเป็น 480 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้น ผ้าเบรกที่ไม่มียางผสมจะมีระดับแรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ที่อุณหภูมิสูง

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร ปริมาณ 1.2% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ช่วงต้นของการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 100°C ระดับแรงเสียดทานของผ้าเบรกมีระดับราว 430 N เมื่ออุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 580 N และค่อนข้างไม่คงที่ หลังจากนั้นจึงค่อยๆ ลดลง จนมีค่าเป็น 500 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 630 N และมีการผันผวนอยู่ในช่วง ± 40 N เมื่อทดสอบถึงอุณหภูมิ 250°C แรงเสียดทานเฉลี่ยมีค่าลดลงเป็น 570 N และกลับเพิ่มขึ้นเป็น 680 N และมีความผันผวนไม่คงที่ หลังจากนั้นแรงเสียดทานลดลงมาที่ 630 N จนถึงที่อุณหภูมิ 300°C แรงเสียดทานยังคงลดลงต่อเนื่องจนถึง 450 N และมีความผันผวนอย่างมาก ในช่วงกว้างถึง ± 80 N เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 350°C ระดับแรงเสียดทานเริ่มคงที่ อยู่ในช่วง 450 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ซึ่งมีระดับแรงเสียดทานที่ไม่คงที่ ดังนั้นผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานไม่คงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิ

พิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกยาง NBR ไมโคร ปริมาณ 1.4% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C ระดับแรงเสียดทานของผ้าเบรกมีค่าเฉลี่ยราว 420 N และค่อนข้างคงที่ เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 150°C พบว่า ระดับแรงเสียดทานไม่คงที่ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 600 N และค่อยๆ ลดลงมาเหลือ 500 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C แรงเสียดทานเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 650 N และลดลงเหลือ 500 N และมีความผันผวนอย่างมาก เมื่อการทดสอบมาถึงที่อุณหภูมิ 250°C แรงเสียดทานมีความไม่เสถียร โดยมีความผันผวนอย่างมาก จนถึงที่อุณหภูมิ 300°C แรงเสียดทานเริ่มค่อยๆ คงที่ โดยมีการผันผวนอยู่ในช่วง ± 30 N จนถึงที่อุณหภูมิ 350°C แรงเสียดทานเริ่มคงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยที่ 500 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้นผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร ที่ปริมาณ 1.4% โดยน้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานค่อนข้างคงที่หรือมีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 250°C สำหรับช่วงอุณหภูมิก่อนหน้านี้เป็นช่วงที่ผ้าเบรกกำลังปรับตัว

เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร ปริมาณ 1.6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C ผ้าเบรกมีระดับแรงเสียดทานราว 430 N และค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 550 N และค่อยๆ ลดลงเหลือ 450 N และ ไม่คงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C แรงเสียดทานไม่คงที่ โดยมีค่ามากที่สุดราว 600 N และต่ำสุดราว 480 N เมื่อการทดสอบมาถึงที่อุณหภูมิ 250°C แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยราว 580 N และลดลงมาเหลือ 430 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงถึง 300°C แรงเสียดทานจึงเริ่มคงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยราว 480 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 350°C แรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยราว 480 N หลังจากนั้นเป็น

ช่วง cool down ดังนั้น ผ้าเบรกที่ผสมด้วยยาง NBR ไมโคร 1.4% โดยน้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 250 - 350°C

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกยาง NBR ไมโคร ปริมาณ 1.8% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C แรงเสียดทานของผ้าเบรกล่วงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยราว 430 N เมื่ออุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 600 N และไม่คงที่ หลังจากนั้นแรงเสียดทานจึงค่อยๆ ลดลงมาเหลือ 480 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200°C พบว่าแรงเสียดทานไม่คงที่ โดยแรงเสียดทานลดลงเหลือ 400 N หลังจากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 550 N และลดลงมาเหลือ 450 N อีกครั้ง เมื่อการทดสอบมาถึงที่อุณหภูมิ 250°C แรงเสียดทานเริ่มคงที่ และมีค่าเพิ่มจาก 430 N เป็น 480 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 300°C แรงเสียดทานยังคงคงที่ และมีค่าเฉลี่ยราว 500 N เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 350°C แรงเสียดทานยังคงคงที่ และมีค่าเฉลี่ยราว 500 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ซึ่งมีระดับแรงเสียดทานที่ไม่คงที่ จากลักษณะไดอะแกรมที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.4 และ 1.6% โดยน้ำหนัก ดังนั้น ผ้าเบรกที่มียาง NBR ไมโคร 1.8% โดยน้ำหนักมีระดับแรงเสียดทานที่คงที่ในช่วงอุณหภูมิ 250 - 350°C เช่นเดียวกัน

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร ที่ปริมาณ 2.0% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า แรงเสียดทานของผ้าเบรกไม่คงที่ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 500 – 580 N จนกระทั่งอุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า เสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าเปลี่ยนจาก 600 N ลดลงเหลือ 500 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C พบว่า ในช่วงนี้แรงเสียดทานมีความผันผวนอย่างมาก โดยมีค่าต่ำสุดของแรงเสียดทานที่ 310 N ใกล้ขีดจำกัดต่ำสุด และมีค่าสูงสุดที่ 630 N เมื่อการทดสอบมาถึงที่อุณหภูมิ 250°C แรงเสียดทานยังคงผันผวน และมีค่าเพิ่มจาก 300 N เป็น 480 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงถึง 300°C แรงเสียดทานเริ่มค่อยๆ คงที่ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 520 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 350°C พบว่า ระดับแรงเสียดทานกลับมาไม่คงที่ โดยมีความผันผวนในช่วง ± 40 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้น ผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 2.0% โดยน้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานไม่คงที่

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร ที่ปริมาณ 2.2% โดยน้ำหนัก แสดงดังในรูปที่ 4.7 ในช่วงต้น ที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า แรงเสียดทานของผ้าเบรกไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 450 เป็น 550 N และลดลงเหลือ 430 N เมื่ออุณหภูมิของการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ และมีค่าเพิ่มเป็น 600 N จากนั้นลดลงเหลือ 550 N และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่เช่นเดิม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 610 N

และลดลงเหลือ 550 N จากนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 630 N อีกครั้ง เมื่อการทดสอบมาถึงที่อุณหภูมิ 250°C พบว่า แรงเสียดทานมีความผันผวนอย่างมาก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 400 – 580 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบสูงถึง 300°C แรงเสียดทานลดลงเหลือ 430 N และเริ่มคงที่ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 350°C พบว่า แรงเสียดทานกลับมาไม่คงที่ หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down เมื่อพิจารณาผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 2.0% โดยน้ำหนัก พบว่ามีระดับแรงเสียดทานที่ไม่คงที่

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 1.2% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ในช่วงต้นของการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า แรงเสียดทานมีลักษณะคงที่ และมีค่าเฉลี่ยราว 420 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าเกือบคงที่ และมีค่าเฉลี่ยราว 560 N อย่างไรก็ตาม ช่วงท้ายแรงเสียดทานมีค่าลดลงเหลือ 410 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 610 N จากนั้นค่อยๆ ลดลงเหลือ 550 N และเพิ่มขึ้นเป็น 590 N อีกครั้งหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 250°C แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มจาก 590 N เป็น 640 N จากนั้นลดลงเหลือ 580 N และเพิ่มขึ้นเป็น 630 N อีกครั้งหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 300°C พบว่า แรงเสียดทานมีความผันผวนอย่างมาก จนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 350°C แรงเสียดทานเริ่มมีลักษณะที่ผันผวนน้อยลง โดยมีแรงเสียดทานต่ำสุดที่ 480N และสูงสุดที่ 530 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้นผ้าเบรกที่ผสมด้วยยาง NBR นาโน 1.2% โดยน้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานที่ไม่คงที่

เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 1.4% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ในช่วงต้นของการทดสอบที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า แรงเสียดทานมีระดับไม่คงที่ จนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 550 N และค่อยๆ ลดลงเหลือ 460 N จากนั้นเพิ่มเป็น 540 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C พบว่า แรงเสียดทานเริ่มคงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยที่ 590 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 250°C แรงเสียดทานเริ่มไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มเป็น 640 N และลดลงเหลือ 580 N เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสูงขึ้นเป็น 300°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ และมีค่าลดลงเหลือ 500 N เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มเป็น 350°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีแรงเสียดทานเฉลี่ยที่ 500 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้นผ้าเบรกที่ผสมด้วยยาง NBR นาโน 1.4% โดยน้ำหนัก พบว่ามีระดับแรงเสียดทานที่ไม่คงที่

การพิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 1.6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C แรงเสียดทานมีระดับค่อนข้างคงที่ โดยมี

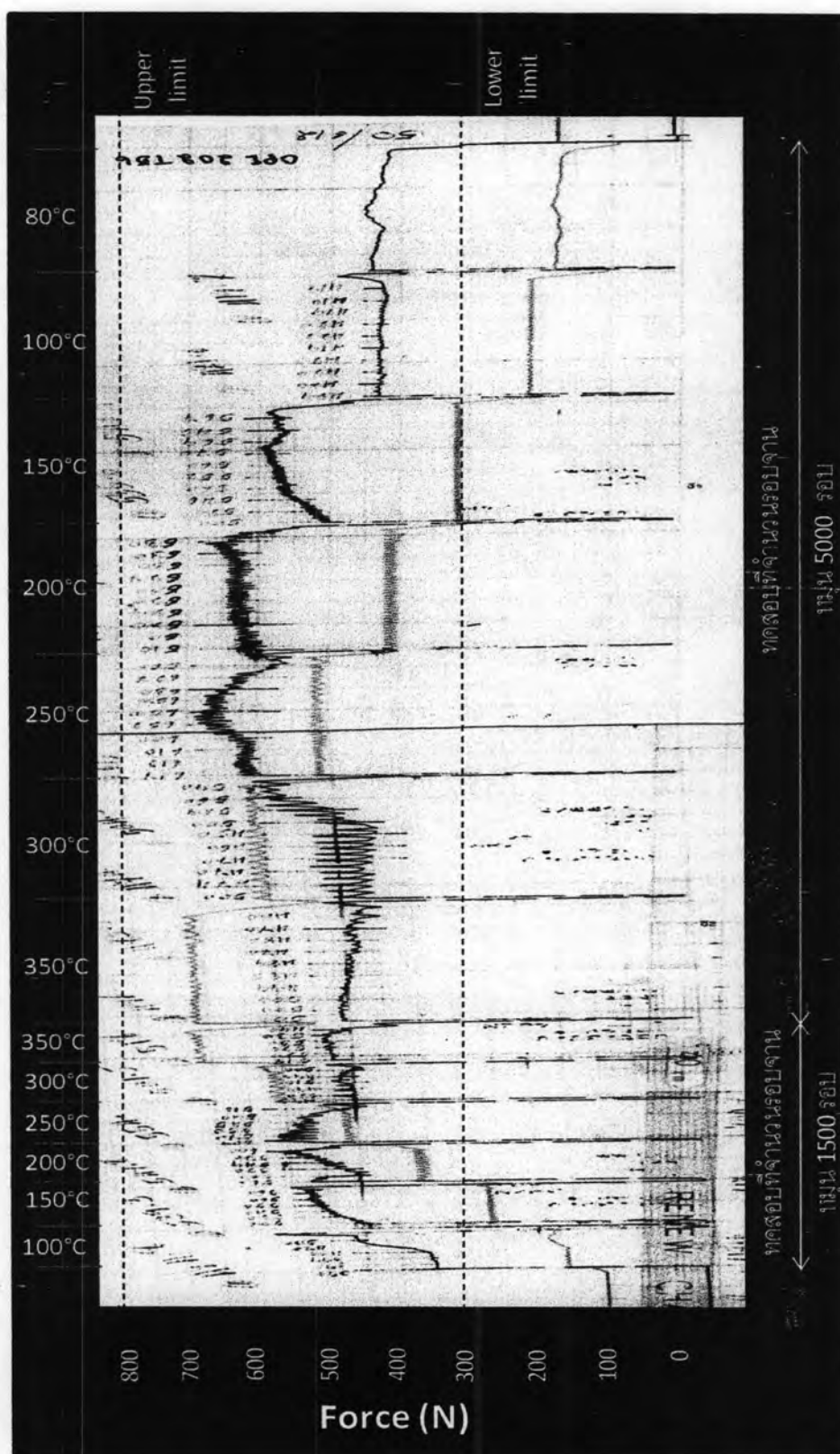
มีแรงเสียดทานเฉลี่ยที่ 420 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 600 N และลดลงเหลือ 500 N และเพิ่มขึ้นเป็น 550 N อีกครั้ง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 600 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 250°C แรงเสียดทานเริ่มมีความผันผวนเกิดขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง ± 30 N เมื่ออุณหภูมิการทดสอบสูงขึ้นเป็น 300°C พบว่า ในช่วงเริ่มต้นแรงเสียดทานมีระดับไม่คงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 400 N จากนั้น เพิ่มขึ้นเป็น 510 N และเริ่มคงที่ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 350°C พบว่า แรงเสียดทานเริ่มมีค่าที่คงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 500N หลังจากนั้นเป็นการ cool down ดังนั้น ค่าเบรคที่ผสมด้วยยาง NBR นาโน 1.6% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงระดับแรงเสียดทานที่คงที่อุณหภูมิ 200 - 250°C และช่วงอุณหภูมิ 300 - 350°C โดยในช่วงต้นของการทดสอบที่ 150 - 200°C เป็นช่วงที่ค่าเบรคกำลังปรับตัว

เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานของค่าเบรคที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 1.8% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า แรงเสียดทานมีระดับไม่คงที่ โดยมีค่าสูงสุดที่ 550 N และลดลงเหลือ 460 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 600 N และค่อยๆ ลดลงเหลือ 550 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 200°C พบว่า ระดับแรงเสียดทานเริ่มมีความผันผวนน้อยลง โดยมีค่าเพิ่มเป็น 650 N และลดลงเหลือ 580 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 250°C แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 630 N และลดลงเหลือ 550 N และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเป็น 580 N เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสูงขึ้นเป็น 300°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าสูงสุด 680 N เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มเป็น 350°C พบว่า แรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าลดลงเหลือ 500 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้นค่าเบรคที่ผสมด้วยยาง NBR นาโน 1.8% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงระดับแรงเสียดทานที่ไม่คงที่

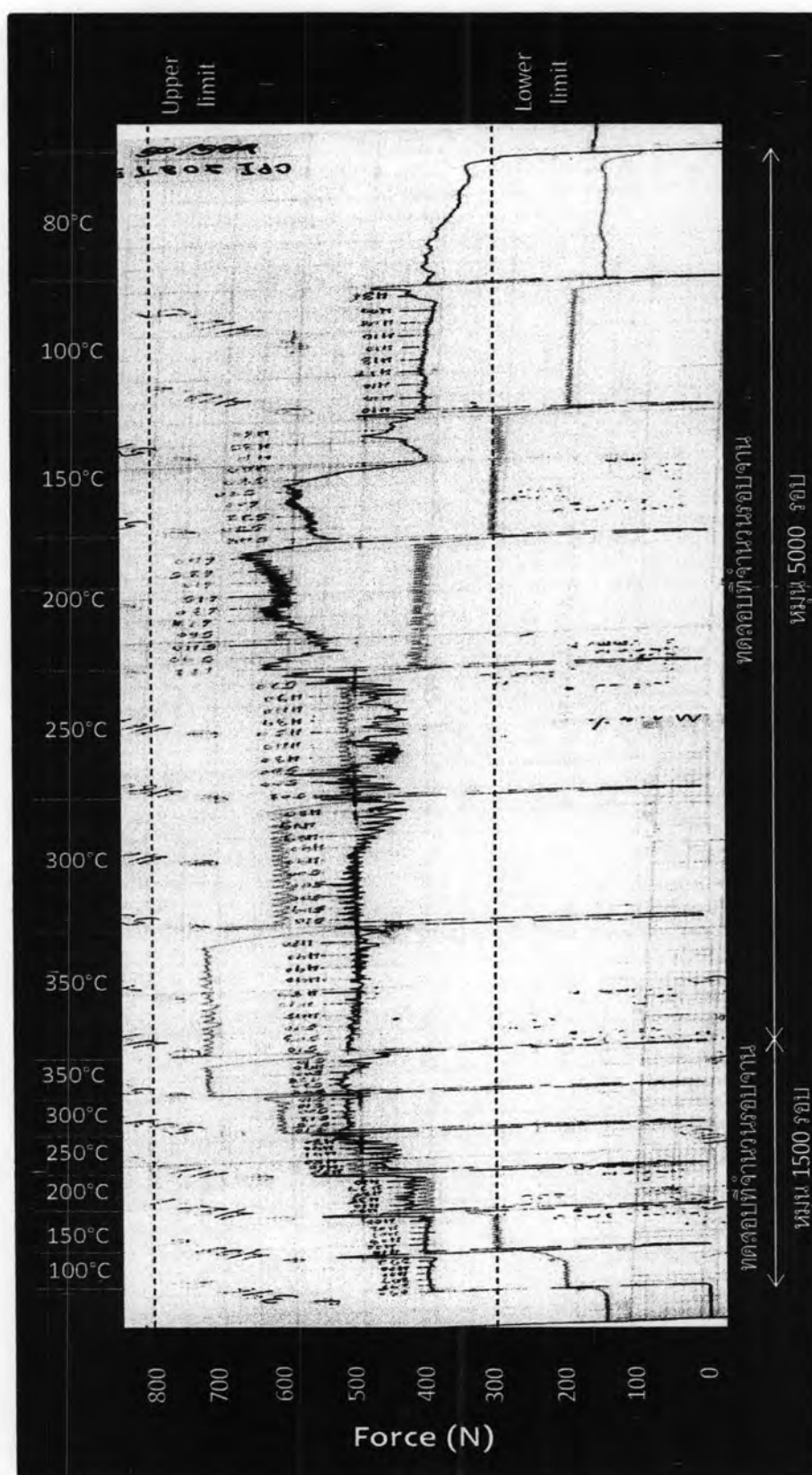
เมื่อพิจารณาแรงเสียดทานของค่าเบรคที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 2.0% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ในช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C พบว่า แรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยราว 420 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทานเริ่มมีความผันผวนเกิดขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 420 N เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าไม่คงที่อย่างมาก โดยมีค่าผันผวนอยู่ในช่วง ± 100 N จากนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 250°C พบว่า มีแรงเสียดทานยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าผันผวนอยู่ในช่วง ± 200 N เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 300°C พบว่า แรงเสียดทานคงยังไม่คงที่ แต่มีความผันผวนน้อยลง จนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 350°C พบว่า แรงเสียดทานเริ่มมีลักษณะคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยราว 520 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้นค่า

เบรกที่ผสมด้วยยาง NBR นาโน 2.0% โดยน้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานที่คงที่ที่อุณหภูมิในช่วง อุณหภูมิ 300 - 350°C

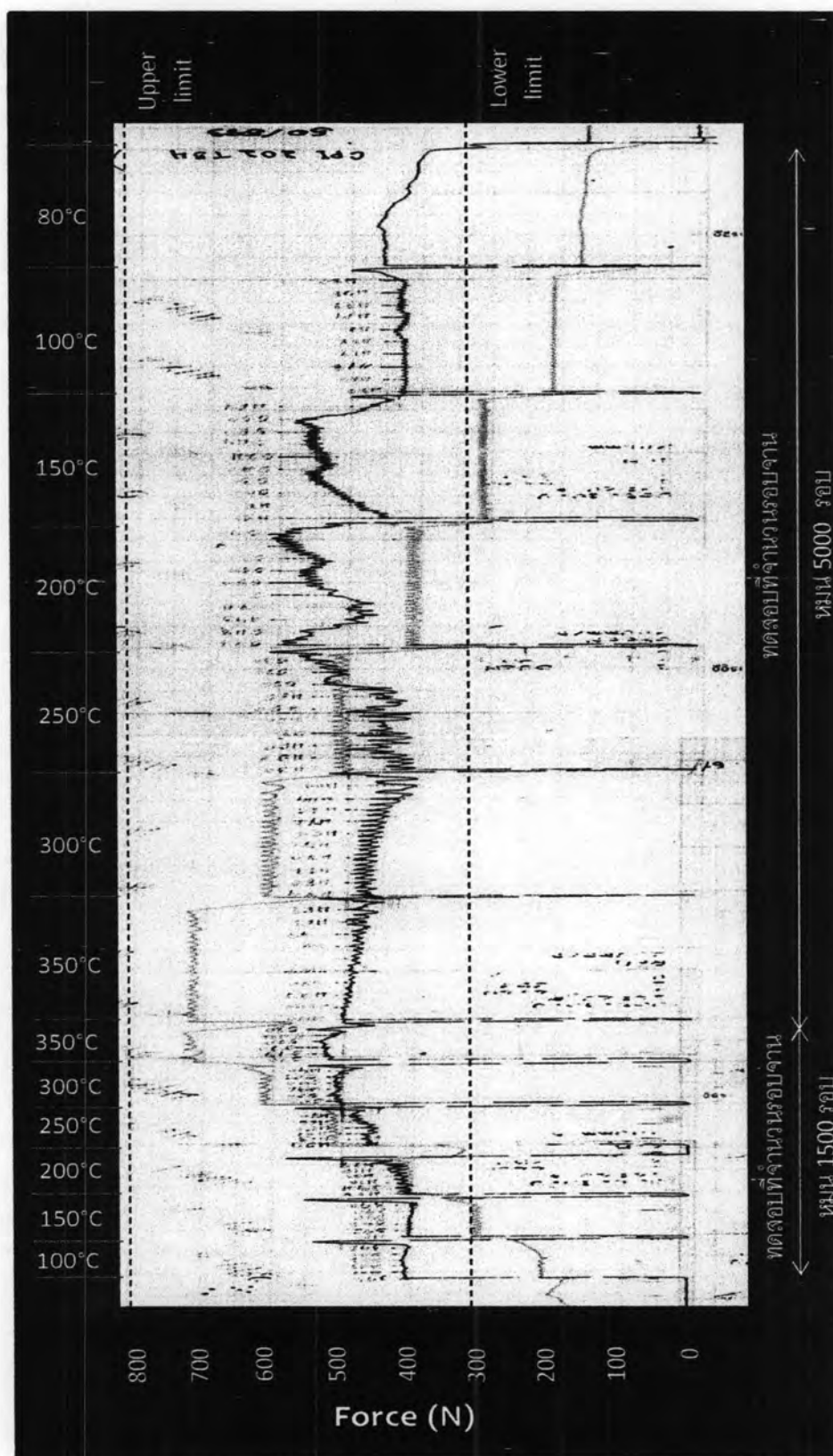
พิจารณาแรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 2.2% โดยน้ำหนัก ดัง แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่า ช่วงต้นที่อุณหภูมิ 100°C แรงเสียดทานมีค่าไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 480 N และลดลงเหลือ 420 N เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มเป็น 150°C พบว่า แรงเสียดทาน ยังคงไม่คงที่ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 580 N และลดลงเหลือ 420 N และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200°C ถึง 250°C พบว่า แรงเสียดทานมีความผันผวนอย่างมาก โดยมีค่าความผันผวนอยู่ในช่วง ± 200 N จนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 300°C พบว่า แรงเสียดทานเริ่มคงที่ โดยมีค่าความผันผวนอยู่ในช่วง ± 50 N จนกระทั่งอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 350°C พบว่า แรงเสียดทานมีค่าคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยราว 500 N หลังจากนั้นเป็นช่วง cool down ดังนั้นผ้าเบรกที่ผสมด้วยยาง NBR นาโน 2.2% โดย น้ำหนัก มีระดับแรงเสียดทานที่คงที่ ณ อุณหภูมิ 350°C



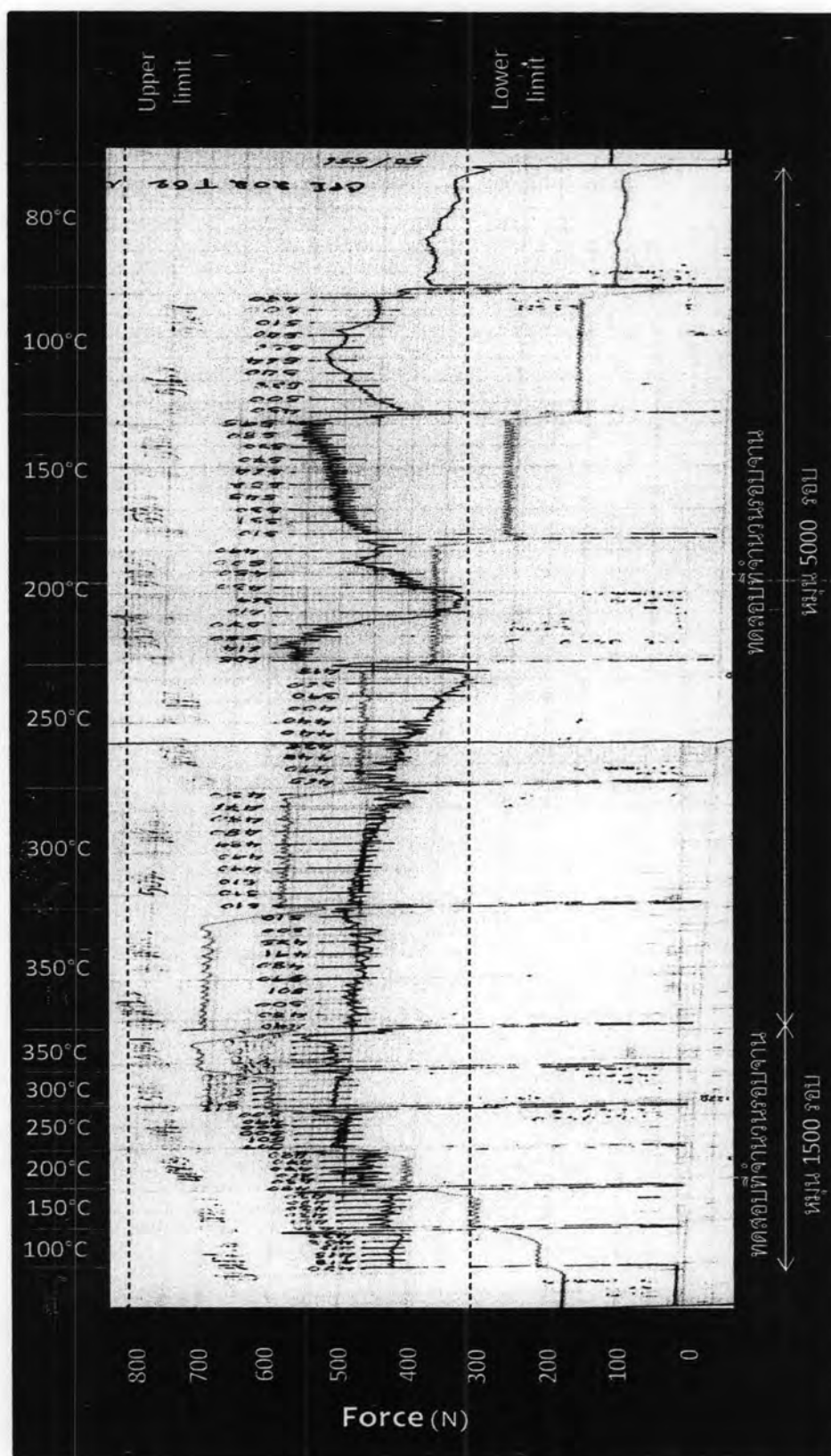
รูปที่ 4.2 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.2% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



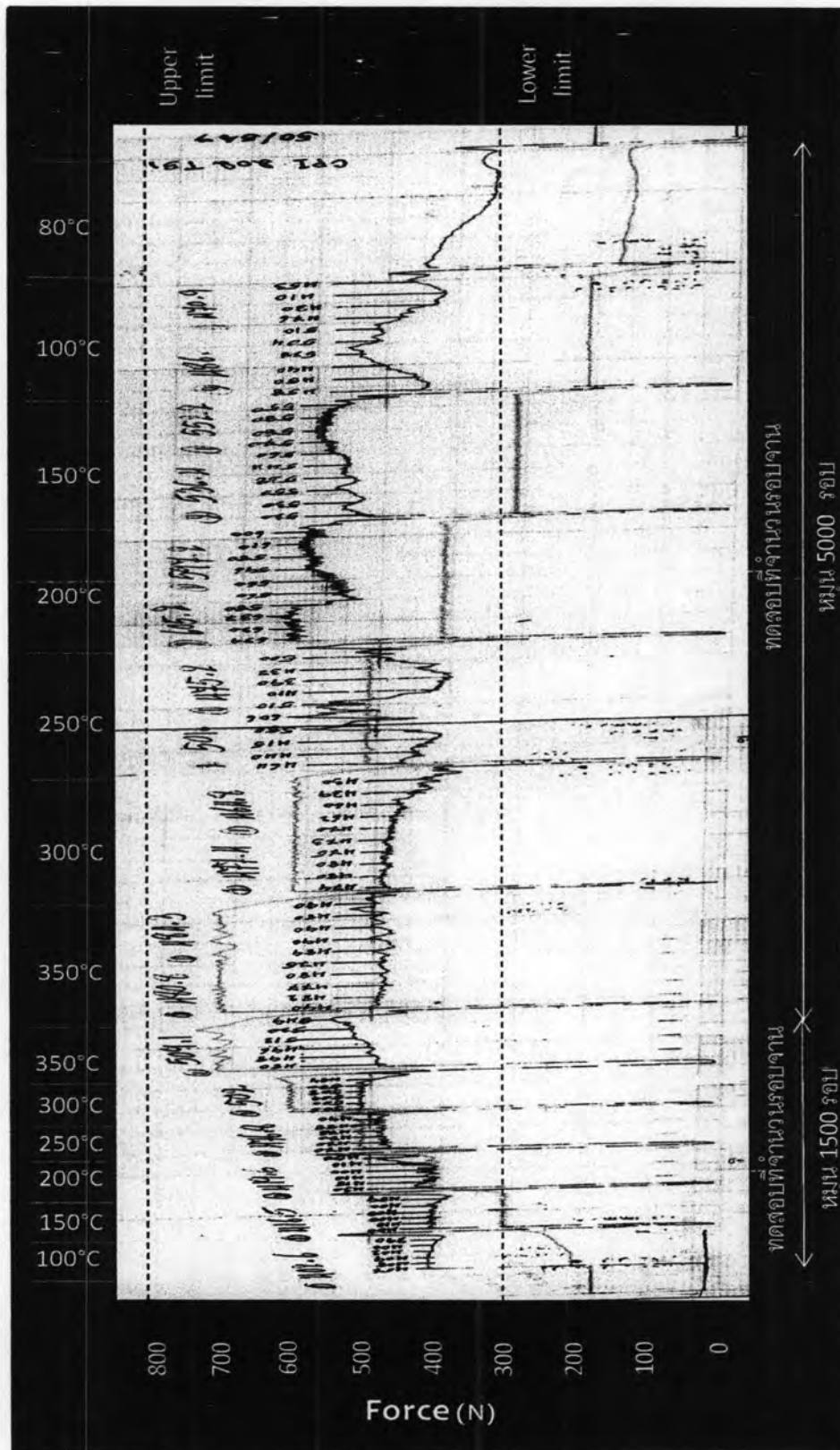
รูปที่ 4.3 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.4% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



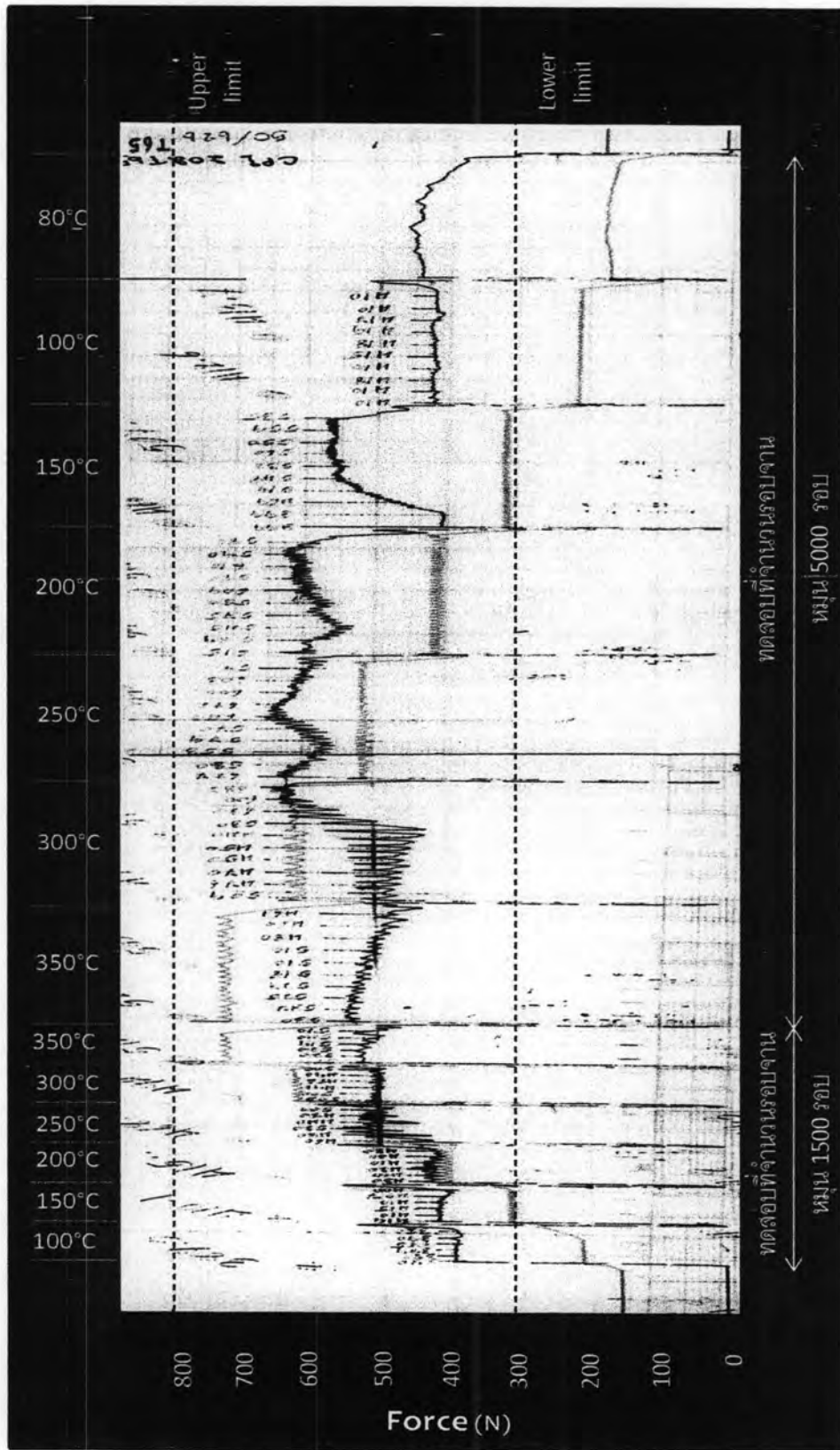
รูปที่ 4.4 แรงเฉื่อยคานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 1.6% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



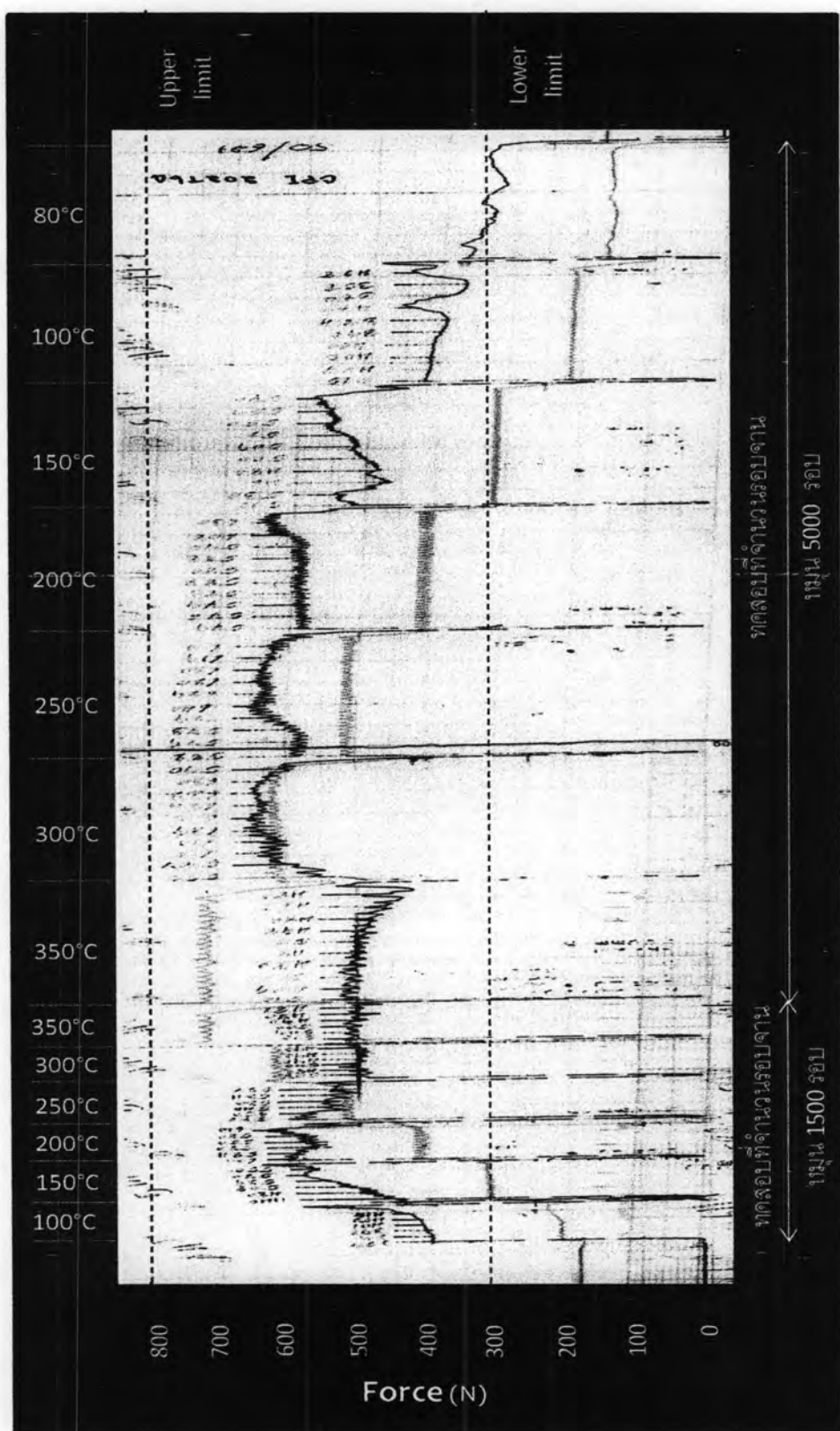
รูปที่ 4.6 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 2.0% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



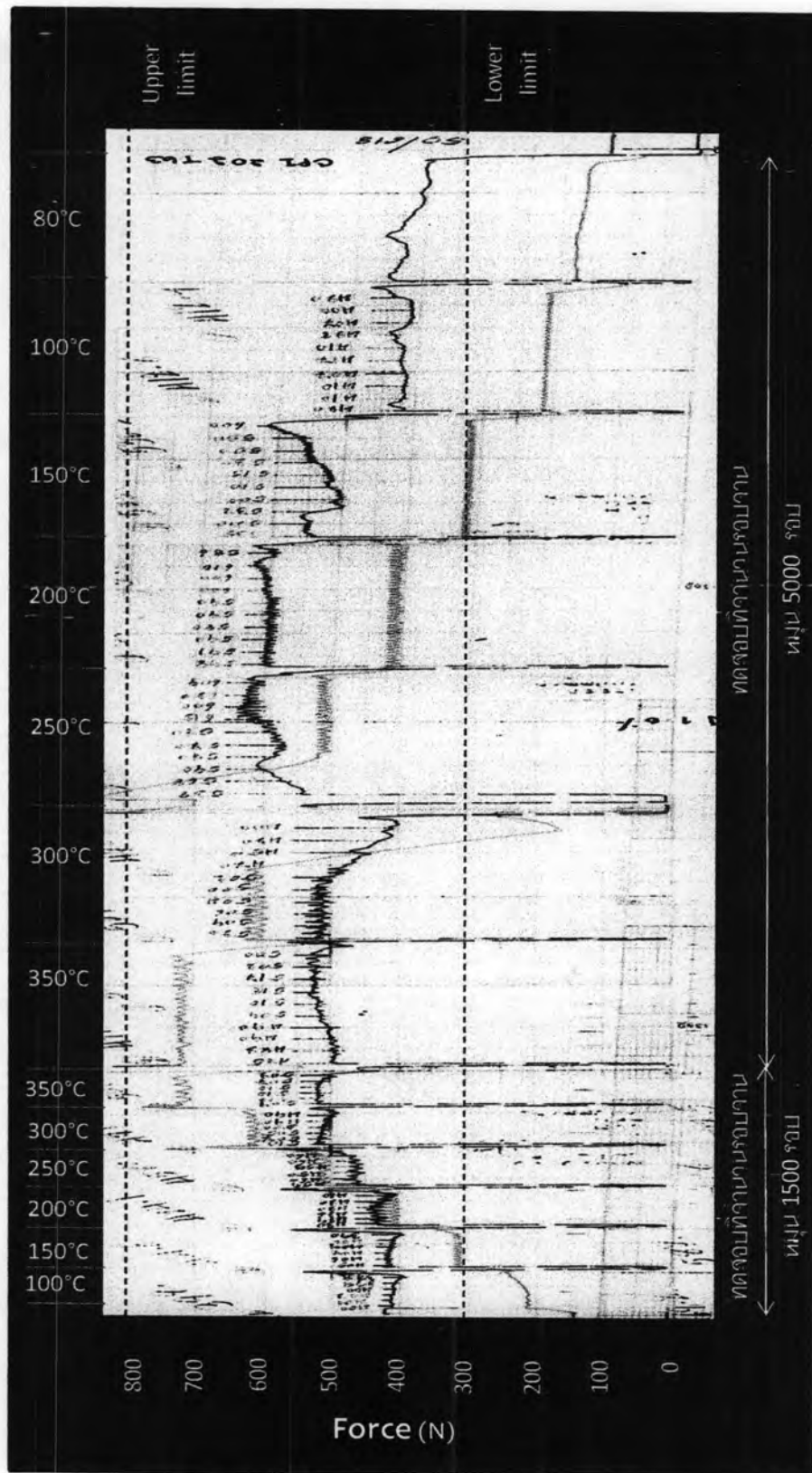
รูปที่ 4.7 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร 2.2% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



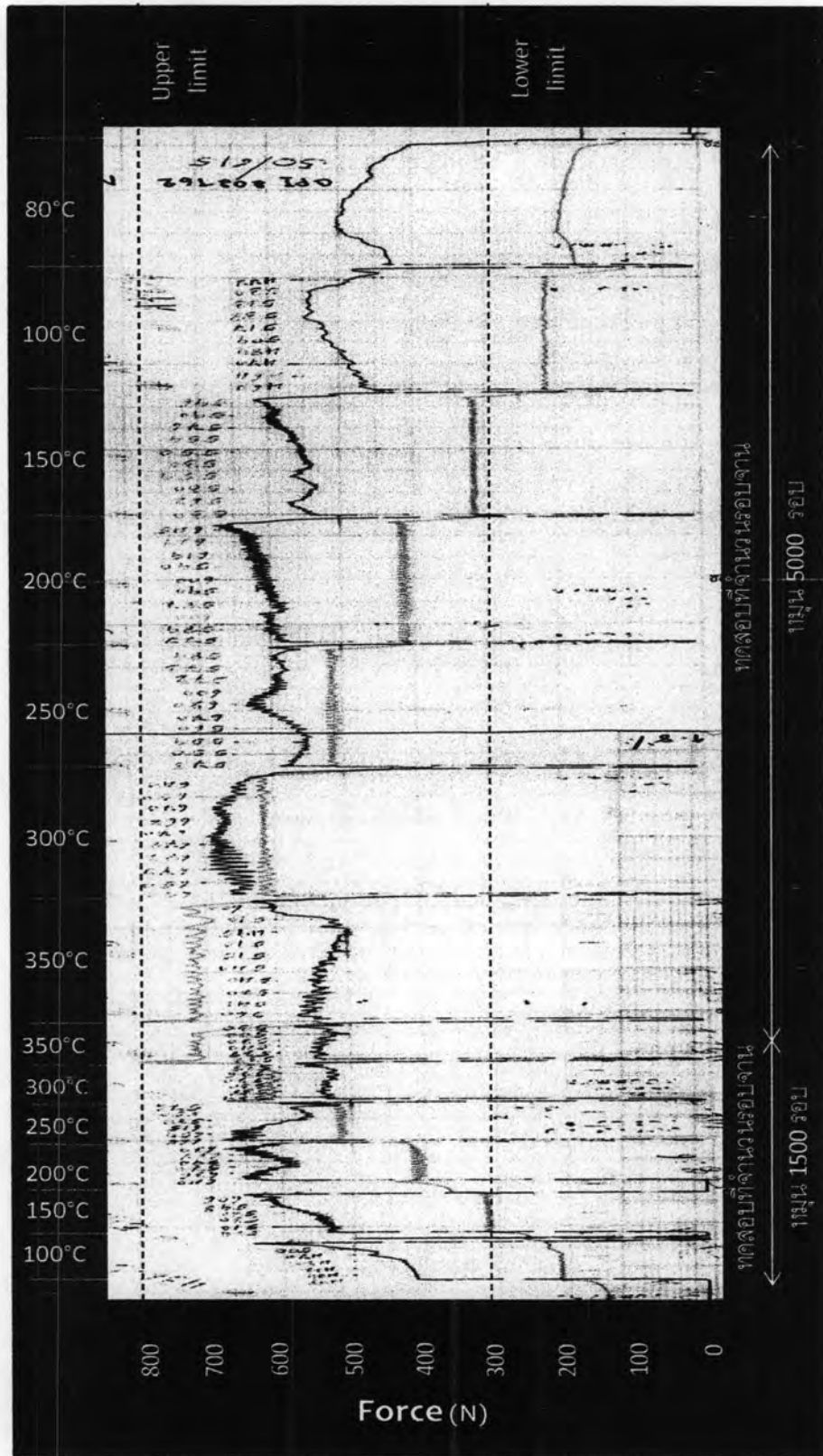
รูปที่ 4.8 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.2% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



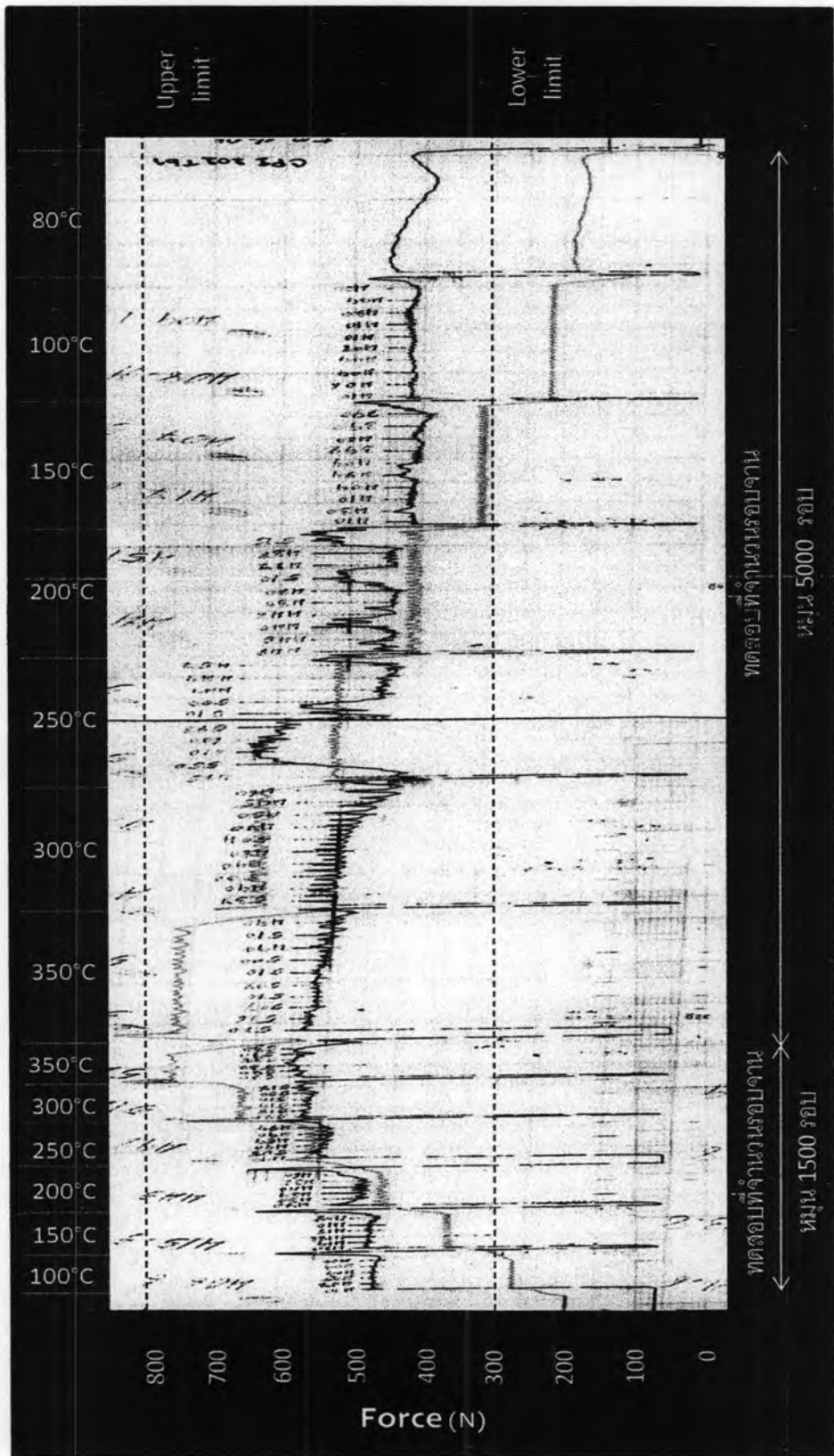
รูปที่ 4.9 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.4% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.10 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.6% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.11 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 1.8% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.12 แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน 2.0% โดย น้ำหนัก ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่เดิมยาง NBR ไมโคร ในปริมาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสามารถ คำนวณได้ ตามสมการ (1)

$$\text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน} = AVSFF(N) / 1225.8 (N) \quad (1)$$

$$AVSFF = \text{แรงเสียดทานเฉลี่ยของข้อมูลที่เสถียรในครึ่งหลังของช่วงอุณหภูมิ (N)}$$

(Average Value of Stabilized friction force in the latter half of total friction distance)

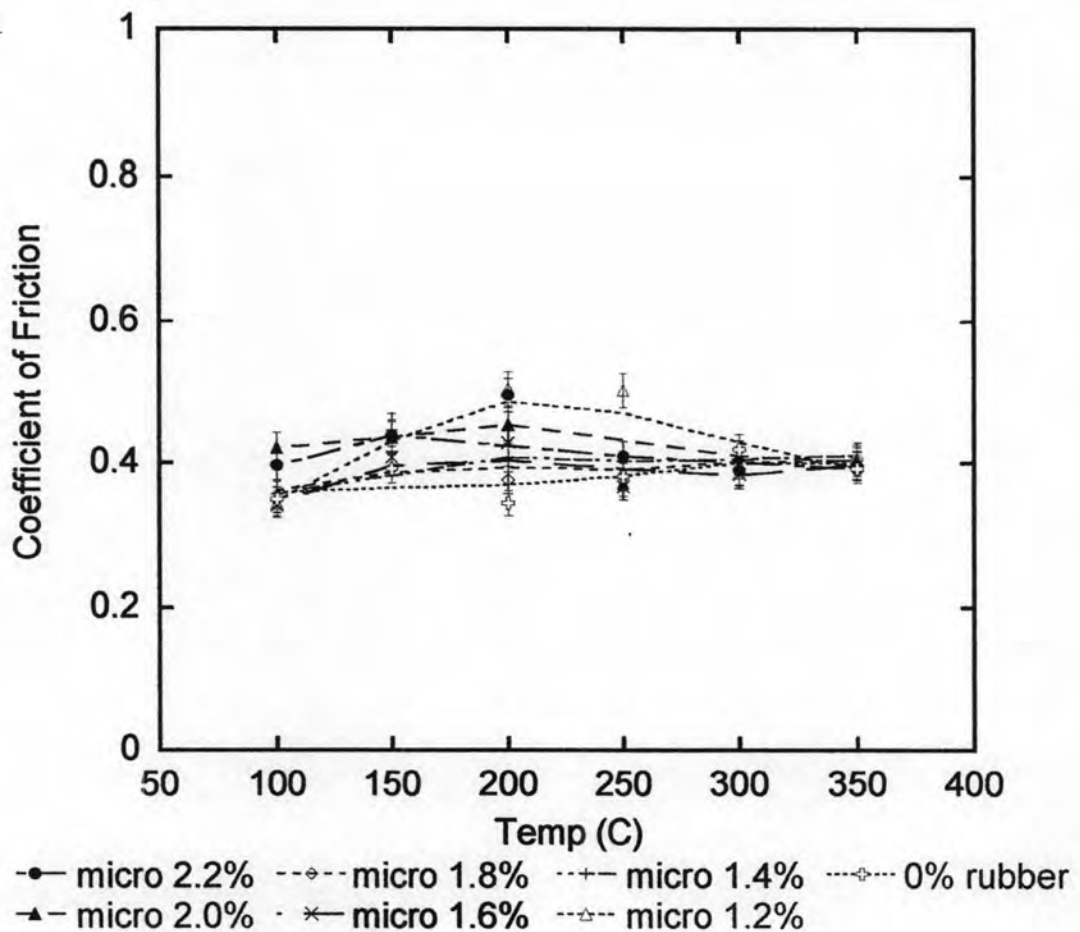
พบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่ไม่มียางผสม และผ้าเบรกที่ผสมยางไมโคร 1.4, 1.6 และ 1.8% โดยน้ำหนัก มีลักษณะที่ค่อนข้างคงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแรงเสียดทานของผ้าเบรกทั้งสี่สูตรดังกล่าวข้างต้น ที่มีลักษณะค่อนข้างคงที่ และมีความผันผวนของค่าอยู่ในช่วงไม่กว้าง (รูปที่ 4.1, 4.3, 4.4 และ 4.8) จึงส่งผลให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 250°C พบว่า พบว่าผ้าเบรกยางไมโคร 2.2% โดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่คงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 300°C ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกยางไมโคร 2.0% โดยน้ำหนัก มีค่าที่คงที่ขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกยางไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก ยังคงมีค่าไม่คงที่ถึงแม้อุณหภูมิของผ้าเบรกจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 350°C ก็ตาม

รูปที่ 4.15 แสดงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกที่เดิมยาง NBR นาโน ปริมาณต่างๆ พบว่า ผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน ปริมาณ 1.6% และ 2.0% โดยน้ำหนัก มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผ้าเบรกดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับแรงเสียดทานที่วัดได้ของผ้าเบรกทั้งสอง ที่มีระดับของแรงเสียดทานค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 4.10 และ 4.12) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงเป็น 300°C ผ้าเบรกที่ผ้าเบรกยางนาโน 1.2% โดยน้ำหนัก ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเริ่มมีลักษณะค่อนข้างคงที่ ถึงแม้อุณหภูมิของผ้าเบรกจะสูงถึง 300°C ผ้าเบรกยางนาโน 1.4, 1.8 และ 2.2% โดยน้ำหนัก ยังคงมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ไม่คงที่

ตามมาตรฐาน JIS D4411 แรงเสียดทานของผ้าเบรก พบว่า ทั้งที่ใส่ยาง NBR ไมโครและนาโน มีค่าแรงเสียดทานอยู่ในพิสัยตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม ลักษณะที่พึงประสงค์ของผ้าเบรกที่ผู้ผลิตผ้าเบรกส่วนใหญ่ต้องการมีดังนี้

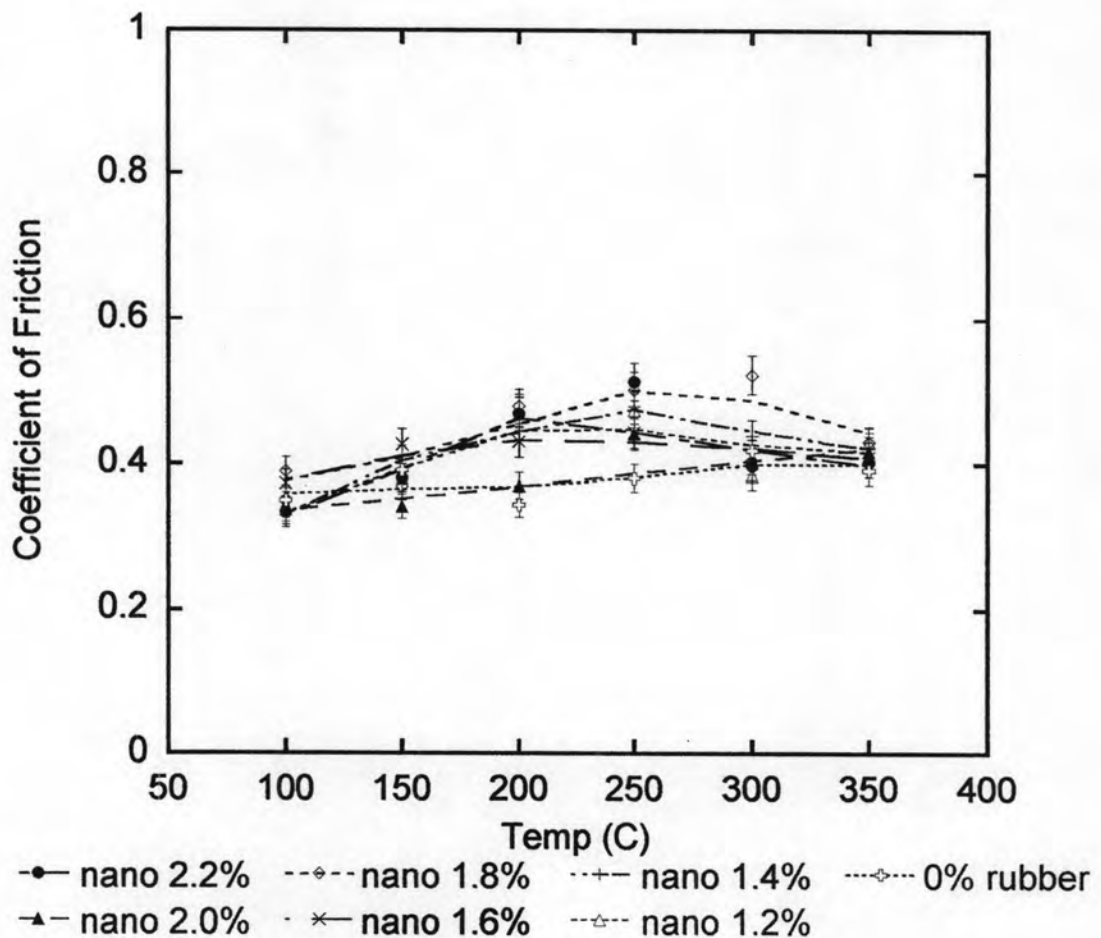
- i. มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เสถียรตลอดช่วงอุณหภูมิการใช้งานระหว่าง 100 - 350°C ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพของการเบรก ผ้าเบรกที่ดีควรจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่คงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิการใช้งาน เพื่อลดปัญหาการเกิดอาการ fade

- ii. มีค่าแรงเสียดทานตลอดช่วงอุณหภูมิการทดสอบอยู่ในช่วง 300 – 800 N ระดับแรงเสียดทานของผ้าเบรคตลอดช่วงอุณหภูมิการทดสอบ ควรมีระดับที่ใกล้เคียงกัน และไม่ควรมีค่าที่สูงหรือต่ำเกินไป เนื่องจากหากแรงเสียดทานของผ้าเบรคมีค่าต่ำ หมายถึงความสามารถของผ้าเบรคในการหยุดล้อจะต่ำลงด้วย ทำให้ต้องออกแรงในการเหยียบเบรคมากขึ้นหรือระยะการหยุดรถมากขึ้น แต่เมื่อแรงเสียดทานมีค่ามาก ๆ จะส่งผลให้ล้อรถเกิดการลื้อลื้อคและเกิดการกระชากระหว่างเหยียบเบรคเนื่องจากระยะหยุดรถที่สั้นเกินไป
- iii. มีความผันผวนของแรงเสียดทานในช่วงแคบๆ ระดับความผันผวนของแรงเสียดทานของผ้าเบรคควรจะอยู่ในช่วงแคบๆ เพื่อรักษาประสิทธิภาพของผ้าเบรคในการหยุดล้อ โดยทุกๆ ครั้งของการเบรค ผ้าเบรคจะต้องมีประสิทธิภาพการหยุดล้อที่ใกล้เคียงกันทุกครั้ง ในทุกๆ ความเร็วและทุกๆ ช่วงอุณหภูมิของผ้าเบรค



รูปที่ 4.14 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรคที่ผสมยางไมโคร ที่ปริมาณต่างๆ

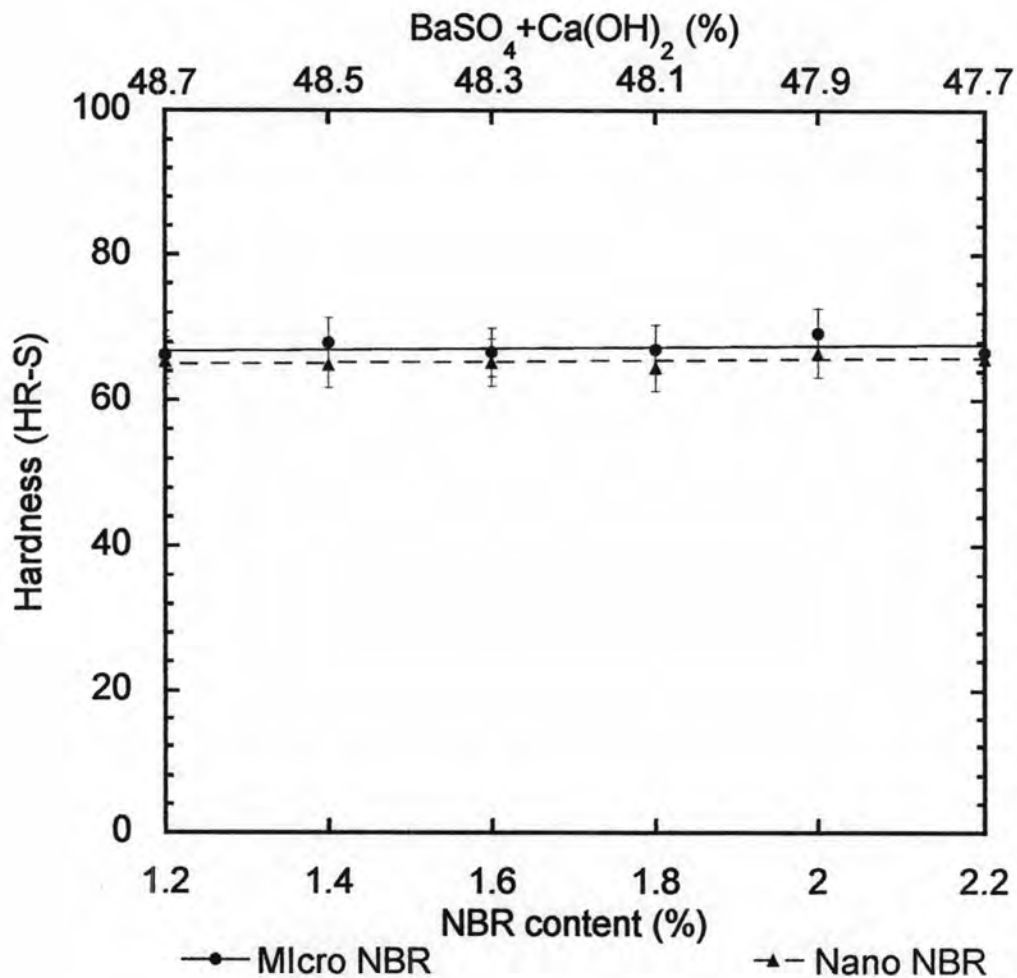
ผลการทดสอบผ้าเบรกยางไมโคร และยางนาโนที่ปริมาณต่างๆ แสดงให้เห็นว่าผ้าเบรกยางไมโคร 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.2% โดยน้ำหนัก มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เสถียรในช่วง 200 - 350°C และผ้าเบรกยางนาโน 1.6% โดยน้ำหนัก มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เสถียรในช่วง 200 - 350°C เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกยางไมโคร 1.4, 1.6, 1.8 และ 2.2% โดยน้ำหนัก เทียบกับ ผ้าเบรกยางนาโน 1.6% โดยน้ำหนัก พบว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีความเสถียรในช่วง 250 - 350°C และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 0.4



รูปที่ 4.15 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่ผสมยางนาโนที่ปริมาณต่างๆ

4.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness testing)

การทดสอบความแข็งของผ้าเบรกด้วยวิธี Rock well scale S เพื่อศึกษาว่าผ้าเบรกที่เติมผง ยาง NBR นาโน มีความแข็งเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรเมื่อเทียบกับผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครที่ ปริมาณเดียวกัน โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน มีค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยกว่าผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครเล็กน้อย



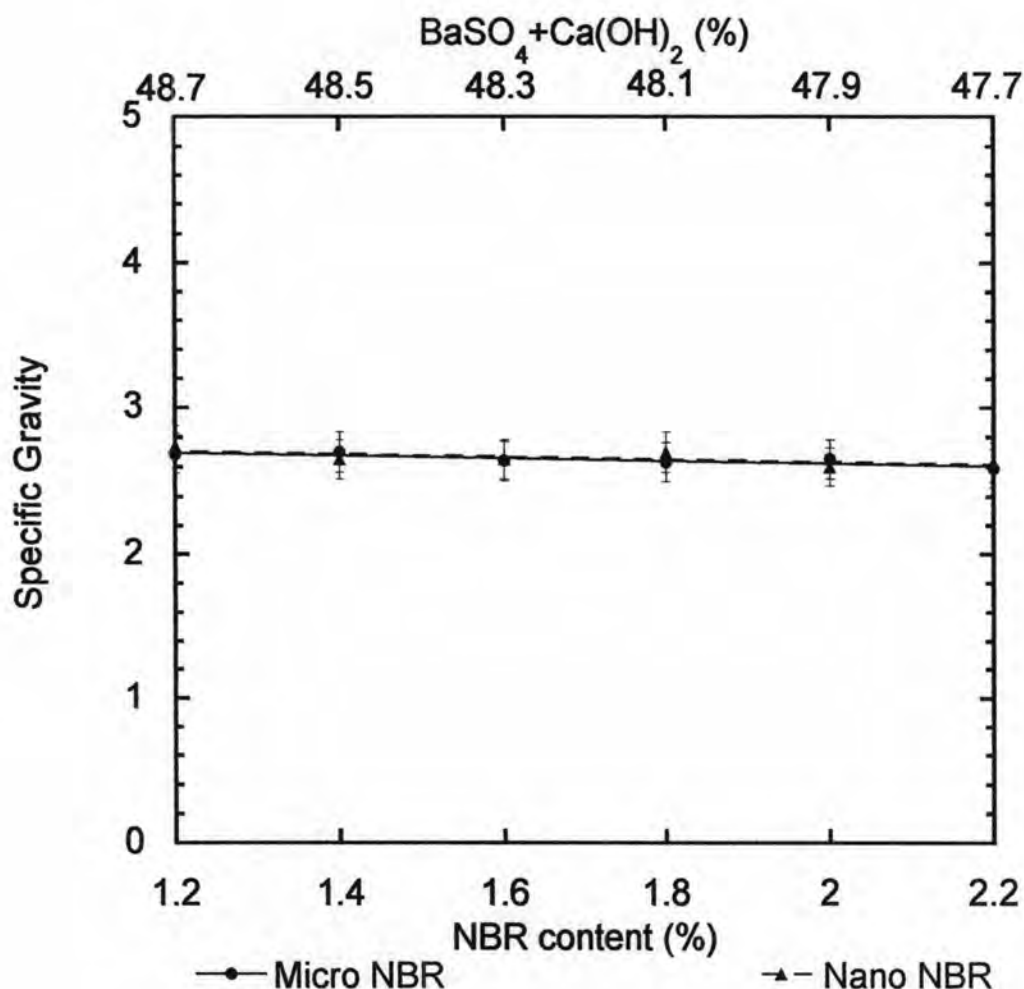
รูปที่ 4.16 ความแข็งของผ้าเบรกที่มีปริมาณยาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ

การพิจารณาค่าความแข็งของผ้าเบรก เมื่อปริมาณยาง NBR ทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ความแข็งของผ้าเบรกมีแนวโน้มเกือบคงที่ เนื่องจากเมื่อปริมาณของยาง NBR ลดลง ผู้ผลิตผ้าเบรกจำเป็นต้องใส่สารเพิ่มเนื้อ เช่น $BaSO_4$ เพื่อชดเชยปริมาณยางที่ลดลง เนื่องจากต้องรักษามวลรวมของผ้าเบรกให้เต็มแม่พิมพ์ผ้าเบรก แต่เมื่อปริมาณของยาง NBR เพิ่มขึ้น ผู้ผลิตก็ต้องลดปริมาณ $BaSO_4$ เช่นกัน ซึ่ง $BaSO_4$ มีความแข็ง 70 (Rockwell Hardness) [32] ซึ่งใกล้เคียงกับความแข็งของยาง NBR ซึ่งมีค่าระหว่าง 60-75 หลังจากผ่านการบ่ม[33,34] ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงปริมาณของยาง NBR และแบเรียมซัลเฟต ไม่มีผลต่อระดับความแข็งของผ้าเบรกเท่าใดนัก

4.3 การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity testing)

ความถ่วงจำเพาะเป็นสมบัติเชิงกายภาพที่แสดงว่าผ้าเบรกที่ได้นั้นมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร รูปที่ 4.17 แสดงผลการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่ผสมด้วยยาง NBR ไมโครและยาง NBR นาโนที่ปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อเปลี่ยนจากยาง NBR ไมโครเป็นยาง NBR นาโน ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกเกือบไม่มีความแตกต่าง ทั้งนี้เนื่องจากยาง NBR ไมโครและยาง NBR นาโนเป็นยาง NBR ด้วยกัน โดยยาง NBR ไมโครมีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.04 [35] และยาง NBR นาโนมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.03-1.05 [36] ซึ่งค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยนี้ทำให้ถึงแม้จะเปลี่ยนส่วนผสมจากยางไมโครเป็นยางนาโนค่าความถ่วงจำเพาะหรือน้ำหนักของผ้าเบรกก็ไม่ต่างจากเดิมมากนัก

การพิจารณาผลของปริมาณยางในผ้าเบรกต่อค่าความถ่วงจำเพาะเมื่อเติมผงยางลงในผ้าเบรกปริมาณ 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 และ 2.2% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกลดลงเพียง 3.7% เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นจาก 1.2 % เป็น 2.2% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อปริมาณยางในผ้าเบรกลดลงผู้ประกอบการนิยมใช้ $BaSO_4$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, $Ca(OH)_2$) เป็นสารเติมเต็มในการผลิตผ้าเบรก แต่ทั้ง $BaSO_4$ และ $Ca(OH)_2$ ต่างมีค่าความถ่วงจำเพาะค่อนข้างสูงคือ 4.5 [37] และ 2.24 [38] ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของยาง NBR ไมโครและยาง NBR นาโน ประมาณ 4.5 และ 2 เท่าตามลำดับ เมื่อเติมยางในปริมาณเพิ่มขึ้นผู้ผลิตต้องลดปริมาณของ $BaSO_4$ ในผ้าเบรกให้เหลือน้อยลง จึงเป็นเหตุให้ผ้าเบรกที่ผลิตได้มีค่าความถ่วงจำเพาะลดลงตามไปด้วย

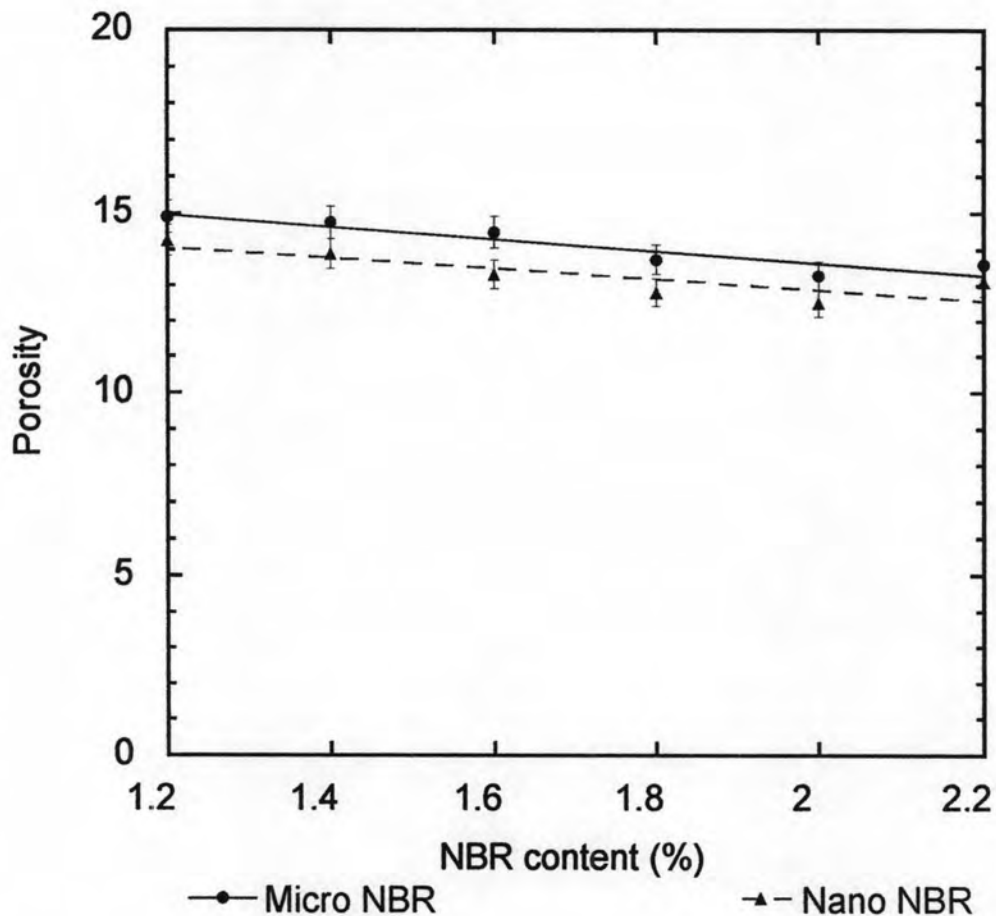


รูปที่ 4.17 ความถ่วงจำเพาะของผ้าเบรกที่มียาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ

4.4 การทดสอบความพรุน (Porosity testing)

การทดสอบความพรุนเป็นการศึกษาว่าผ้าเบรกมีช่องว่างที่เกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด เมื่อมีการเปลี่ยนส่วนผสมของยาง ผลจากการทดสอบความพรุนแสดงดังในรูปที่ 4.18 พบว่า เมื่อเปลี่ยนส่วนผสมจากยาง NBR ไมโครเป็นยาง NBR นาโน ผ้าเบรกที่ได้มีค่าความพรุนลดลง 6.7%, 6.5%, 6.2%, 6.0%, 5.9% และ 5.2% ที่ปริมาณยาง 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 และ 2.2% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของยาง NBR นาโนมีขนาดเล็กกว่ายาง NBR ไมโครทำให้ยาง NBR นาโนสามารถกระจายตัวแทรกอยู่ในช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อของผ้าเบรก นอกจากนี้การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าอนุภาคของยางนาโนมีการกระจายตัวในเนื้อของผ้าเบรกอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ ผงยาง NBR นาโนสามารถแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อผ้า

เบรกจากอนุภาคขององค์ประกอบอื่นๆ ดีกว่า ยาง NBR ไมโครที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าเป็นพันเท่า จึงเป็นเหตุให้ความพรุนของผ้าเบรกที่ผสมด้วยยาง NBR นาโนมีค่าลดลง



รูปที่ 4.18 ความพรุนของผ้าเบรกที่มียาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ

การพิจารณาผลของปริมาณยางต่อความพรุนของผ้าเบรก เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นจาก 1.2 ถึง 2.2% โดยน้ำหนัก พบว่า ความพรุนของผ้าเบรกลดลง 13% ทั้งผ้าเบรกยางไมโครและยางนาโน เนื่องจากเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นทำให้ในเนื้อของผ้าเบรกมีอนุภาคของยางกระจายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนของอนุภาคยางที่แทรกอยู่ในช่องว่างที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบอื่นๆ ในเนื้อผ้าเบรกมีมากขึ้น ช่องว่างในเนื้อผ้าเบรกจึงลดน้อยลงซึ่งทำให้มีความพรุนน้อยลง

4.5 อัตราการสึกและการสึก (Wear rate and Wear)

การทดสอบอัตราการสึกของผ้าเบรกเป็นการทดสอบเพื่อดูว่าเมื่อนำผ้าเบรกไปใช้งาน ผ้าเบรกจะเกิดการสึกหรือไปมากเท่าใดในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยการคำนวณหาอัตราการสึกของผ้าเบรก คำนวณได้จากสมการ (2) ซึ่งอัตราการสึกของผ้าคำนวณจากความหนาของผ้าเบรกที่ลดลงเทียบกับความหนาของผ้าเบรกก่อนหน้า ตามมาตรฐาน JIS D4411

$$\text{อัตราการสึก} = 1.06 \times (A/n) \times ((d1-d2)/AFF) \times 10^{-3} \text{ (cm/Nm)} \quad (2)$$

โดย

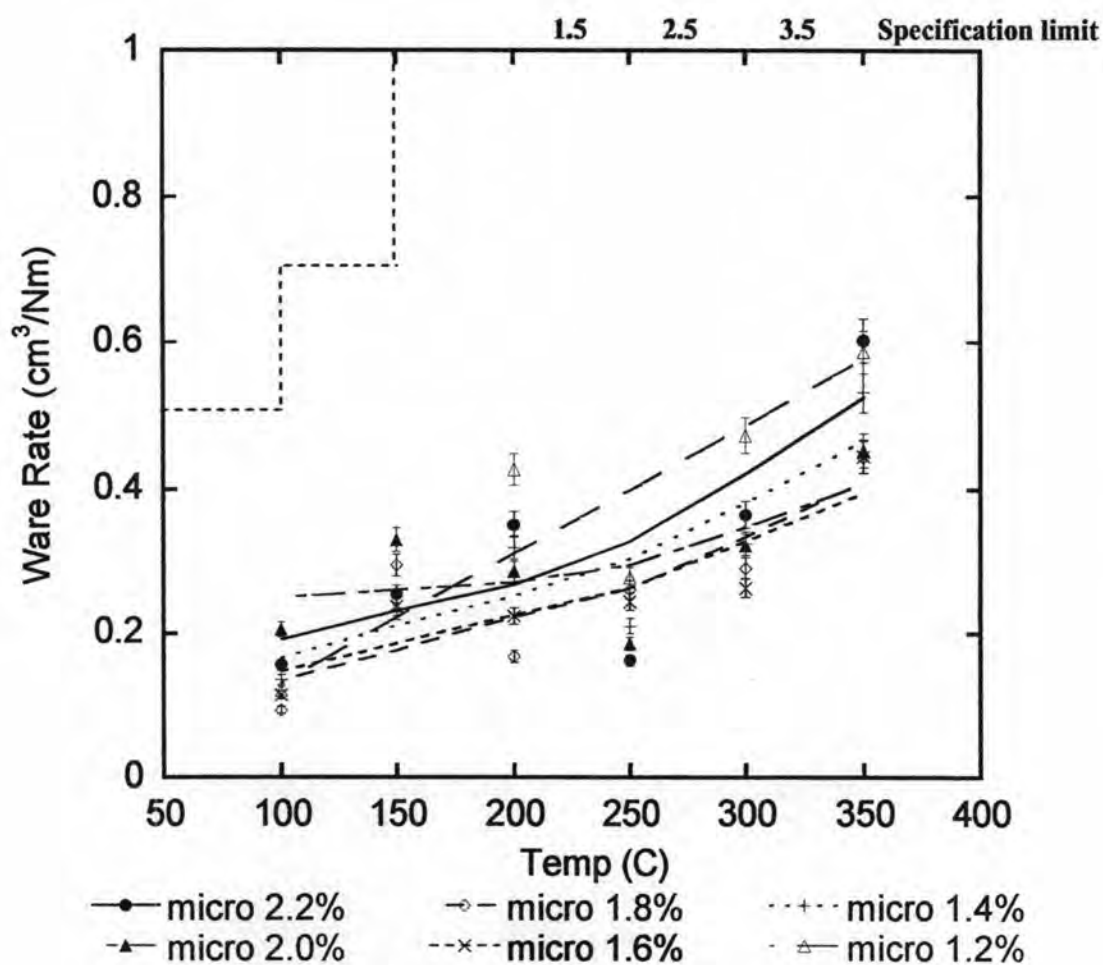
AFF = แรงเสียดทานเฉลี่ยทั่วทั้งช่วงอุณหภูมิ (N)
(Average friction force of total friction distance)

A = 1250 mm² (พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานรวม)

n = 5000 รอบ (จำนวนรอบการหมุนของจานขาขึ้น)

d1-d2 = การสึกเฉลี่ย (mm)

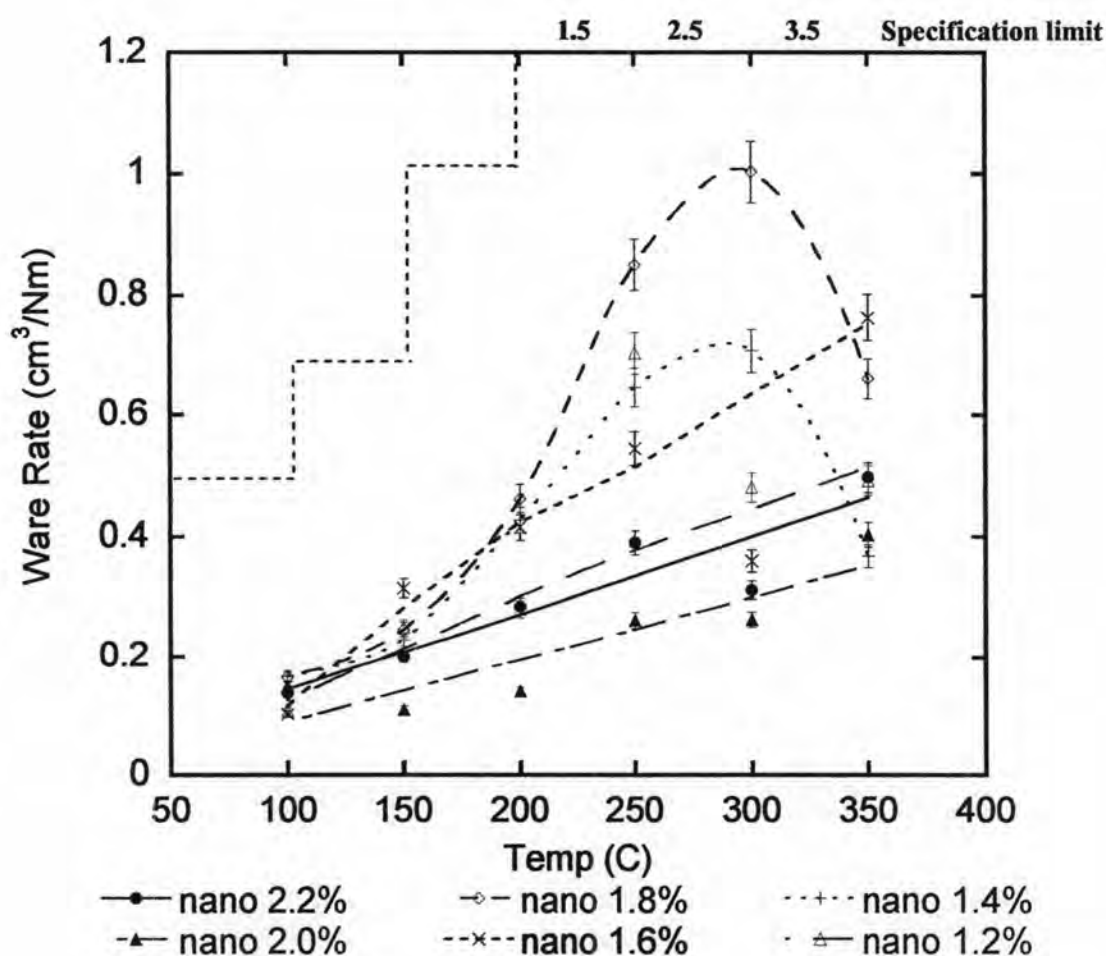
ผลการทดสอบอัตราการสึกของผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 4.19 สำหรับผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิผ้าเบรกเพิ่มขึ้นอัตราการสึกของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยผ้าเบรกที่ผสมยางไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก มีอัตราการสึกสูงที่สุด ส่วนผ้าเบรกที่มีสัดส่วนยางปริมาณอื่นๆ พบว่าอัตราการสึกของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อพิจารณาจากความแข็งของผ้าเบรก พบว่าผ้าเบรกที่ผสมยางไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก มีความแข็งน้อยที่สุด จึงเป็นเหตุให้ผ้าเบรกยางไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก มีอัตราการสึกของผ้าเบรกสูงที่สุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 200°C ผ้าเบรกยางไมโครมีอัตราการสึกที่ค่อนข้างคงที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200°C ถึง 250°C แต่เมื่อผ้าเบรกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากกว่า 250°C ขึ้นไป พบว่าอัตราการสึกของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาจากการการเสื่อมสลายของฟีนอลิกเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่าฟีนอลิกเรซินเกิดการเสื่อมสลายที่มากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200 - 400°C และลดลงมากที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 400°C จึงเป็นเหตุให้ในช่วงอุณหภูมิ 250 - 300°C ผ้าเบรกยางไมโครมีอัตราการสึกสูงขึ้น พิจารณาอัตราการสึกของผ้าเบรกยางไมโครเทียบกับมาตรฐาน JIS D4411 พบว่า ผ้าเบรกยางไมโครทุกสัดส่วนปริมาณยาง มีอัตราการสึกอยู่ในพิสัยตามมาตรฐานที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.19 อัตราการสึกของผ้าเบรกที่ผสมด้วยยางไมโคร ที่ปริมาณต่างๆ

อัตราการสึกของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ขนาดอนุภาคระดับนาโนในปริมาณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของผ้าเบรกเพิ่มสูงขึ้น ผ้าเบรกที่ผสมยางนาโนในปริมาณ 1.2%, 1.6%, 2.0% และ 2.2% โดยน้ำหนัก มีอัตราการสึกเพิ่มขึ้น ผ้าเบรกที่มียางนาโน 1.6% โดยน้ำหนัก มีอัตราการสึกเพิ่มมากกว่าผ้าเบรกที่มียางนาโน 1.2, 2.0 และ 2.2% เมื่อพิจารณาจากความแข็ง พบว่า ผ้าเบรกยางนาโน 1.6% โดยน้ำหนัก มีความแข็ง 65.30 ซึ่งน้อยกว่าผ้าเบรกยางนาโน 2.0%, 2.2% และ 1.2% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 66.50, 65.80 และ 65.40 ตามลำดับ สำหรับผ้าเบรกที่ผสมยางนาโนปริมาณ 1.4% และ 1.8% โดยน้ำหนัก พบว่าผ้าเบรกมีอัตราการสึกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และมีอัตราการสึกที่มากกว่าผ้าเบรกยางนาโนที่สัดส่วนปริมาณยางอื่นๆ เมื่ออุณหภูมิผ้าเบรกเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 200 - 300°C โดยผ้าเบรกยางนาโน 1.8% โดยน้ำหนักมีอัตราการสึกมากที่สุด ถัดมาเป็นผ้าเบรกยางนาโน 1.4% โดยน้ำหนักเมื่อพิจารณาจากความแข็งของผ้าเบรก พบว่า ผ้าเบรกยางนาโน 1.8% และ 1.4% โดยน้ำหนัก มีความแข็ง 64.50 และ 64.90 ตามลำดับ ซึ่ง

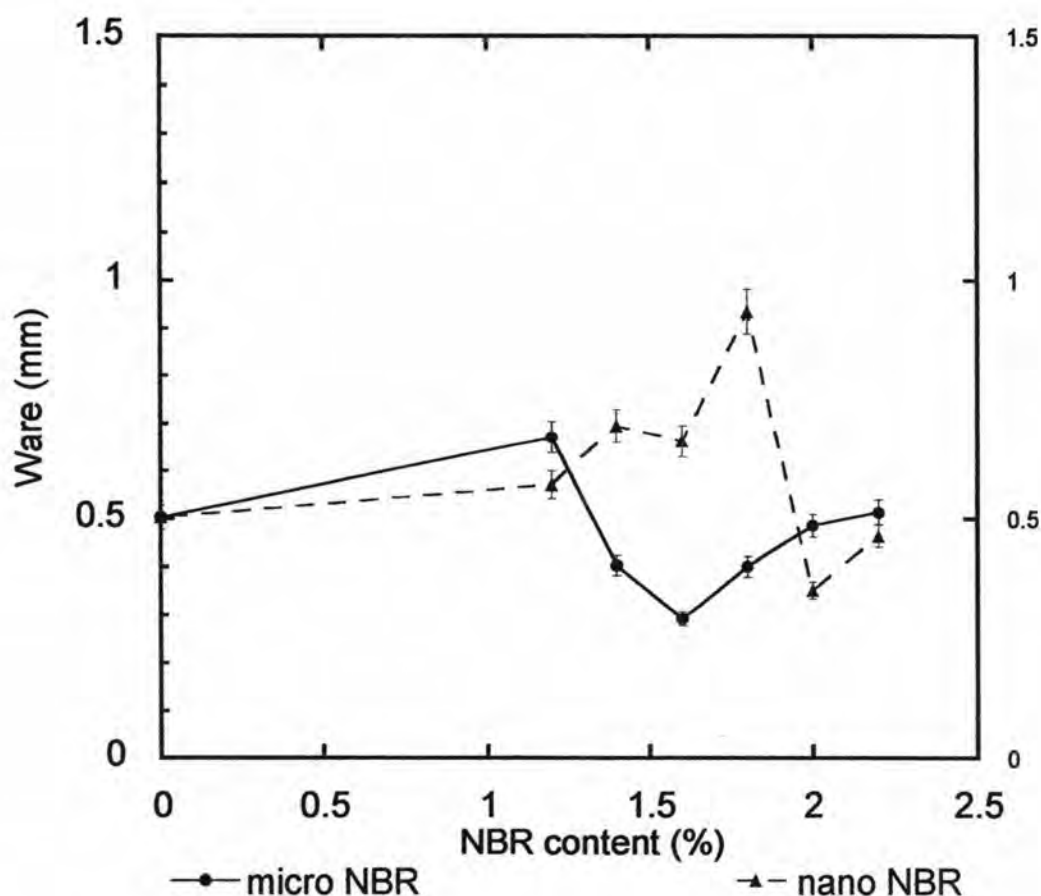
ผ้าเบรคมีความแข็งแรงน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิผ้าเบรค 300°C อัตราการสึกของผ้าเบรคยางนาโน 1.8% และ 1.4% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ 200 - 250°C ฟีนอลิกเรซินมีการเสื่อมสลายเพิ่มขึ้นด้วยจึงทำให้ผ้าเบรคมีอัตราการสึกที่เร็วขึ้น จะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นแม้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 350°C แต่อัตราการสึกของผ้าเบรคกลับลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการสึกของผ้าเบรคที่ผสมด้วยยางนาโนปริมาณ 2.0% และ 1.6% โดยน้ำหนักตามลำดับ พิจารณาอัตราการสึกของผ้าเบรคยางนาโนเทียบกับมาตรฐาน JIS D4411 พบว่า ผ้าเบรคยางนาโนทุกสัดส่วนปริมาณยาง มีอัตราการสึกอยู่ในพิสัยตามมาตรฐานที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.20 อัตราการสึกของผ้าเบรคที่ผสมด้วยยางนาโน ที่ปริมาณต่าง ๆ

การสึกของผ้าเบรคพิจารณาจากความหนาของผ้าเบรคที่หายไป ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่า ผ้าเบรคยางไมโคร 1.2% โดยน้ำหนัก มีการสึกมากที่สุด ตามด้วยผ้าเบรคยางไมโคร 2.2% โดยน้ำหนัก และผ้าเบรคยางไมโคร 1.6% โดยน้ำหนัก มีการสึกของผ้าเบรคน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ

อัตราการสึกของผ้าเบรคยางไมโครในรูปที่ 4.19 ผ้าเบรคยางไมโคร 1.2% โดยน้ำหนักมีอัตราการสึกของผ้าเบรคสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ผ้าเบรคยางไมโคร 2.2% โดยน้ำหนัก และผ้าเบรคยางไมโคร 1.6% โดยน้ำหนักมีอัตราการสึกต่ำที่สุด สำหรับผ้าเบรคยางนาโน พบว่า ผ้าเบรคที่มียางนาโน 1.8% โดยน้ำหนัก เกิดการสึกสูงที่สุด และผ้าเบรคยางนาโน 2.0% โดยน้ำหนัก เกิดการสึกน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาอัตราการสึกของผ้าเบรคยางนาโนในรูปที่ 4.20 ผ้าเบรคยางนาโน 1.8% มีอัตราการสึกสูงที่สุด และผ้าเบรคยางนาโน 2.0% มีอัตราการสึกต่ำที่สุด พิจารณาการสึกของผ้าเบรคยางไมโครและยางนาโน พบว่า มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนที่ระบุว่าผ้าเบรคชนิดใดมีการสึกน้อยกว่ากัน พิจารณาผ้าเบรคยางนาโน 1.2% พบว่า มีการสึกต่ำกว่าผ้าเบรคยางไมโครที่ปริมาณยาง NBR เดียวกัน เมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1.4 – 1.8% โดยน้ำหนัก ผ้าเบรคยางไมโครมีการสึกน้อยกว่า เมื่อปริมาณของยาง NBR เพิ่มขึ้นเป็น 2.0 และ 2.2% โดยน้ำหนัก ผ้าเบรคยางนาโนมีการสึกน้อยกว่าผ้าเบรคยางไมโคร

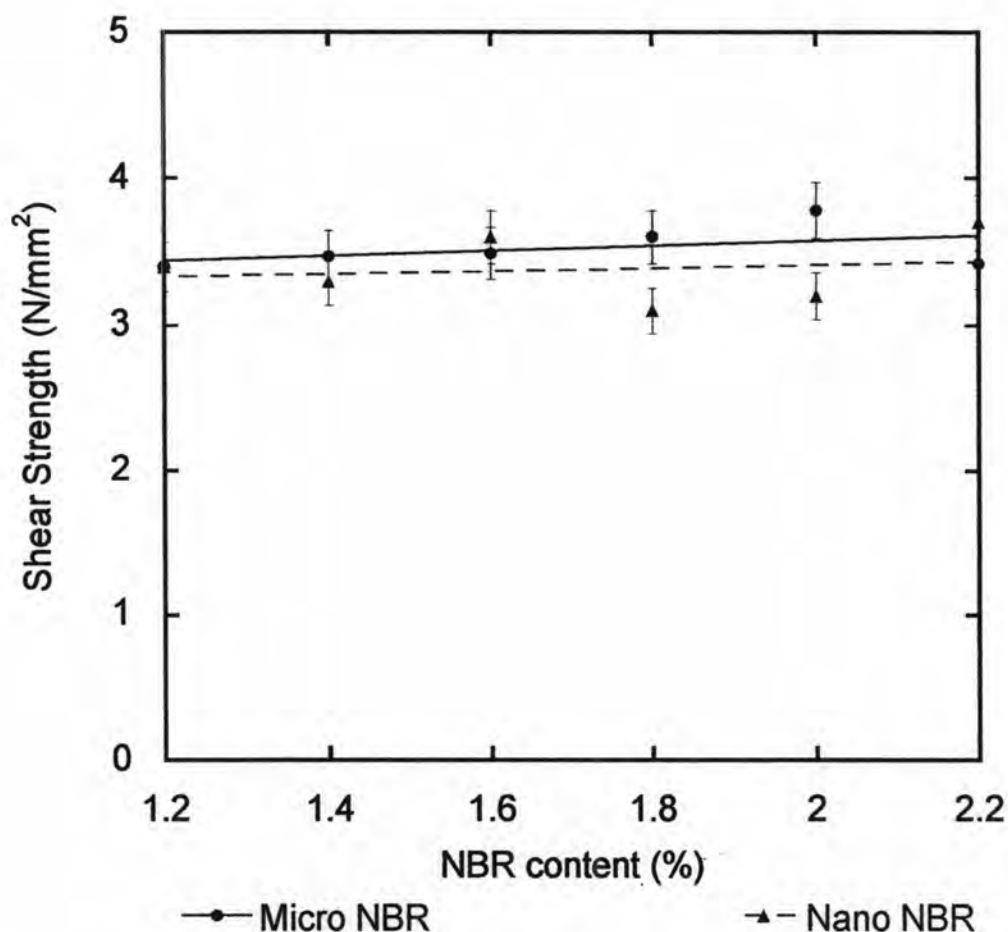


รูปที่ 4.21 ปริมาณการสึกของผ้าเบรคโดยดูจากความหนาที่หายไปของผ้าเบรค ยางไมโคร และยางนาโนที่ปริมาณต่างๆ ภายหลังจากทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึก

4.6 การต้านแรงเฉือน (Shear strength)

การทดสอบการต้านแรงเฉือนเป็นการทดสอบความสามารถของผ้าเบรกในการต้านแรงที่มากกระทำกับผ้าเบรกในทิศทางขนานกับผิวหน้าของผ้าเบรก ผลการทดสอบดังแสดงรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดอนุภาคของยาง NBR ที่ใช้ผสมในผ้าเบรกจากยางไมโครเป็นยางนาโน ความสามารถในการต้านแรงเฉือนของผ้าเบรกมีค่าเฉลี่ยลดลงเล็กน้อยราว 3 – 4% เมื่อใช้ปริมาณยางช่วง 1.2 - 2.2% โดยน้ำหนัก

การพิจารณาอิทธิพลของปริมาณยางต่อการต้านแรงเฉือนของผ้าเบรกที่ใส่ยางไมโคร พบว่า เมื่อปริมาณยางไมโครเพิ่มขึ้นจาก 1.2% เป็น 2.0% โดยน้ำหนัก ความสามารถในการต้านแรงเฉือนของผ้าเบรกมีค่าเพิ่มจากเดิม 18% แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นยางนาโน พบว่า ผ้าเบรกที่ใส่ยางนาโนปริมาณเดียวกันกับยางไมโครมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจาก 1.2% เป็น 2.0% โดยน้ำหนัก สามารถต้านแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเพียง 10% การที่ผ้าเบรกสามารถต้านแรงเฉือนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณยางที่ผสมอยู่ในผ้าเบรกเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็ยางไมโครหรือยางนาโน ทำให้ผ้าเบรกมีความเหนียวเพิ่มขึ้น สามารถทนต่อการถูกแรงเฉือนบิดผิครูปหรือฉีกขาดได้มากขึ้น

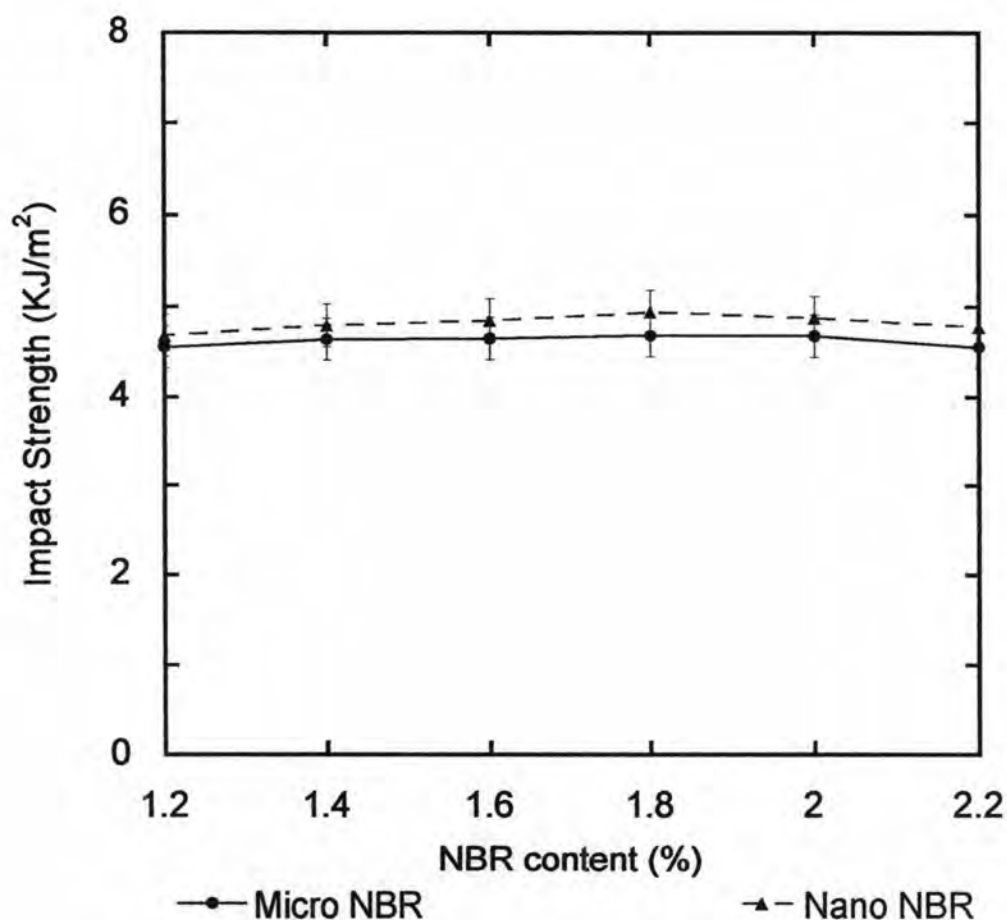


รูปที่ 4.22 การทนต่อแรงเฉือนของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ

4.7 การทนต่อแรงกระแทก (Impact strength)

ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า ผ้าเบรกที่ใส่ยางนาโนทุกปริมาณที่ศึกษาตั้งแต่ 1.2 ถึง 2.2% โดยน้ำหนัก ต่างมีความเหนียวและทนต่อแรงกระแทกได้สูงกว่าผ้าเบรกที่ใส่ยางไมโคร ในปริมาณเดียวกันเล็กน้อย เนื่องจากนาโนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่ายางไมโครเป็นพันเท่า จึงทำให้อนุภาคของยางนาโนสามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงและสม่ำเสมอในเนื้อผ้าเบรก สามารถช่วยรับและกระจายแรงกระแทกที่มากกระทบกับผ้าเบรกได้ดีกว่ายางไมโครซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า การดูดซับพลังงานกระแทกของอนุภาคนาโนเหล่านี้ช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยแตกในเนื้อผ้าเบรก ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ผ้าเบรกที่ผสมด้วยยางนาโนมีความสามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่ายางไมโคร

การพิจารณาอิทธิพลของปริมาณยางต่อความสามารถทนต่อแรงกระแทก เมื่อเพิ่มปริมาณยาง NBR จาก 1.2% เป็น 1.8% โดยน้ำหนัก ความสามารถทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยราว 4% สำหรับยาง NBR ไมโคร และ 2% สำหรับยาง NBR นาโน แต่เมื่อส่วนผสมของยาง NBR เพิ่มขึ้นเป็น 2.0% และ 2.2% โดยน้ำหนัก การทนต่อแรงกระแทกของผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR กลับมีค่าเฉลี่ยลดลงราว 2.5% ทั้งยางไมโครและยางนาโน ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับผลของ Kavdet และคณะ [23] ที่ได้ศึกษาการเพิ่มความเหนียวแก่ฟีนอลิกเรซินด้วยยาง NBR แล้วพบว่าเมื่อปริมาณของยาง NBR เพิ่มขึ้นมากกว่า 2.0% โดยน้ำหนัก ความทนต่อแรงกระแทกของฟีนอลิกเรซินกลับมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปรีดและเวลาบ่มนานขึ้น เพื่อกำจัดฟองอากาศเล็กๆ ที่เกิดขึ้นจากขึ้นรูปรีด ซึ่งฟองอากาศเล็กๆ เหล่านี้จะเป็นตัวขยายระดับแรงที่กระทบให้มากขึ้น ทำให้ความสามารถทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานลดลง

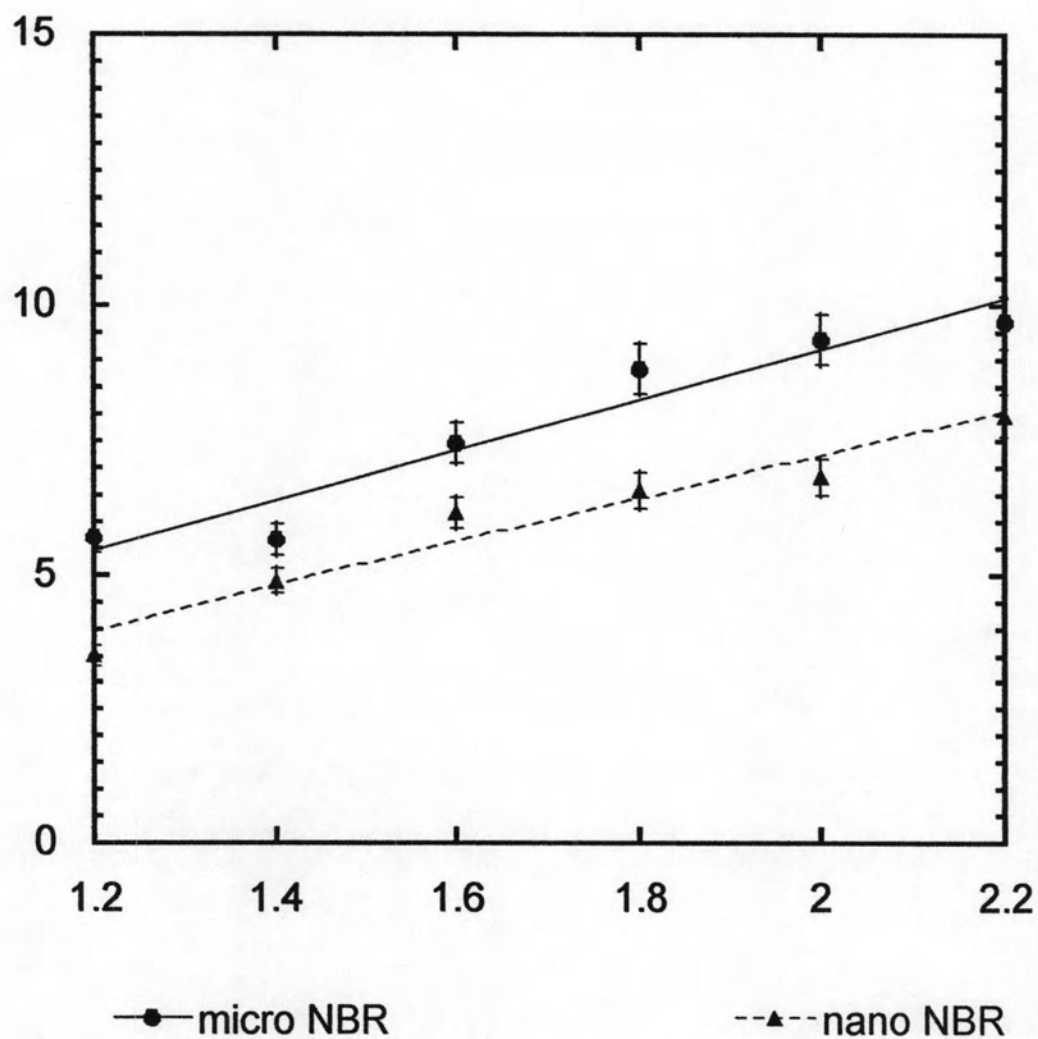


รูปที่ 4.23 การทนต่อแรงกระแทกของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ

4.8 การทนต่อการคดโค้ง (Flexural strength)

การทดสอบคุณสมบัติการทนต่อการคดโค้งของผ้าเบรก กระทำโดยการทดสอบการคดโค้งแบบ 3 จุด เพื่อหาค่าแรงคดโค้งสูงสุด (Maximum Flexural Strength) ที่ทำให้ผ้าเบรกเริ่มแตกที่บริเวณผิวหน้า ผลการทดสอบแรงคดโค้งสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าผ้าเบรกที่ใส่ยาง NBR นาโน มีค่าแรงคดโค้งสูงสุดเพิ่มขึ้นราว 40% เทียบกับผ้าเบรกยางไมโคร ที่ปริมาณยางเท่ากัน ระหว่าง 1.2 ถึง 2.2% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าผ้าเบรกยางนาโนมีค่าแรงคดโค้งสูงสุดที่มากกว่าผ้าเบรกยางไมโครที่ปริมาณยางเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าผ้าเบรกยางนาโนสามารถคดโค้งได้มากกว่าผ้าเบรกยางไมโคร เนื่องจากการอนุภาคยางนาโนมีขนาดเล็กกว่าจึงสามารถกระจายตัวในเนื้อผ้าเบรกได้ดีและสม่ำเสมอ อนุภาคยางนาโนเหล่านี้จะเป็นตัวกระจายแรงภายใต้การคดโค้งที่มากระทำกับผ้าเบรก รวมทั้งอนุภาคของยางมีความเหนียวและยืดหยุ่น ทำให้ผ้าเบรกยางนาโนสามารถรับแรงภายใต้การคดโค้งได้มากกว่าผ้าเบรกยางไมโคร

พิจารณาผลของปริมาณยางต่อแรงคดโค้งสูงสุด พบว่าเมื่อปริมาณยาง NBR ในผ้าเบรกเพิ่มขึ้นจาก 1.2 ถึง 2.2% โดยน้ำหนัก แรงคดโค้งสูงสุดของผ้าเบรก มีค่าเพิ่มขึ้นราว 50% เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความเหนียว เมื่อปริมาณยางในผ้าเบรกเพิ่มขึ้นทำให้ผ้าเบรกมีความเหนียวเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 การทนต่อการคัดโค้งของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและนาโน ที่ปริมาณต่างๆ

4.9 อุณหภูมิการเสื่อมสลายโดยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

อุณหภูมิการเสื่อมตรวจสอบได้โดย การวิเคราะห์ Thermogravimetric เพื่อพิจารณาว่า องค์ประกอบต่างๆ ในผ้าเบรกมีการเสื่อมสลายตัวที่อุณหภูมิใด นับเป็นข้อมูลที่สำคัญเพราะเมื่อผ้าเบรกถูกใช้งานจริง อุณหภูมิของผ้าเบรกขณะใช้งานอาจสูงถึง 350°C สำหรับรถยนต์และ 500°C สำหรับรถบรรทุก

รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบ TGA สำหรับยาง NBR ไมโครและยาง NBR นาโน พบว่า ยาง NBR ทั้งสองชนิดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 195°C Additives ที่เติมในยาง NBR ไมโคร และนาโนเล็กน้อยเกิดการเสื่อมสลายตัวอย่างช้าๆ โดยมีน้ำหนักสูญหายไปราว 2-3% จนกระทั่ง อุณหภูมิสูงถึง 330°C พบว่า ยาง NBR ไมโครเกิดการเสื่อมสลายขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 485°C พบว่า ยาง NBR ไมโคร มีน้ำหนักสูญหายไปราว 83% เนื่องจาก NBR เสื่อมสลายไป เมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นองค์ประกอบที่เหลืออยู่เกิดการเสื่อมสลายตัวอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิ 1000°C พบว่ามีน้ำหนักเหลืออยู่ราว 7% สำหรับยาง NBR นาโน พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 350°C ยาง NBR นาโน เกิดการเสื่อมสลาย จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 500°C พบว่า มีน้ำหนักองค์ประกอบ สูญหายไปราว 87% จากการเสื่อมสลายของยาง NBR เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น องค์ประกอบที่เหลืออยู่ เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายอย่างช้าๆ จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1,000°C พบว่า มีน้ำหนักของ องค์ประกอบเหลืออยู่ราว 7% เท่ากับน้ำหนักที่เหลืออยู่ในยาง NBR ไมโคร เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ ของการเกิดการเสื่อมสลายของยาง NBR พบว่ายาง NBR นาโน จะเกิดการเสื่อมสลายตัวที่อุณหภูมิ สูงกว่ายาง NBR ไมโครราว 20°C

การพิจารณาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของฟีนอลิกเรซิน แสดงดังในรูปที่ 4.26 พบว่า เมื่อ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 230°C มีน้ำหนักฟีนอลิกเหลืออยู่ราว 95% โดย 5% ของน้ำหนักที่หายไปคือ การระเหยของความชื้นที่อยู่ในฟีนอลิก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 380°C ฟีนอลิกเกิดการสลายตัว อย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 570°C ฟีนอลิกเรซินได้สลายไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จนหมด

การเสื่อมสลายขององค์ประกอบอื่นๆ ในผ้าเบรก ได้แก่ เส้นใยอะรามิด ไยหิน ผง friction dust และ BaSO₄ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า ทั้งใยหิน[39] และ BaSO₄ [35] ไม่ เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแต่อย่างใดถึงแม้จะอุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง 1000°C พิจารณาอุณหภูมิการเสื่อม สลายของผง Cashew nut shell friction dust เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 240°C น้ำหนักของ Cashew nut shell friction dust หายไปราว 1% ซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำ และที่อุณหภูมินี้ องค์ประกอบ

ของ Cashew nut shell friction dust เริ่มเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายส่งผลให้น้ำหนักของผง Cashew nut shell friction dust ลดลง จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 400°C ผง Cashew nut shell friction dust เกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็ว จนถึงที่อุณหภูมิ 540°C พบว่า ผง Cashew nut shell friction dust ได้สลายตัวไปจนหมด ส่วนการเสื่อมสลายของเส้นใยอะรามิก ดังแสดงในรูป พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 450°C เส้นใยอะรามิกมีน้ำหนักหายไปราว 5% จากการระเหยของน้ำ อนุภาคอุณหภูมินี้ เส้นใยอะรามิกเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสลายตัว จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 500°C พบว่า เส้นใยอะรามิกเกิดการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็ว [40] จนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิ 560°C เส้นใยอะรามิกเกิดการสลายตัวจนหมด

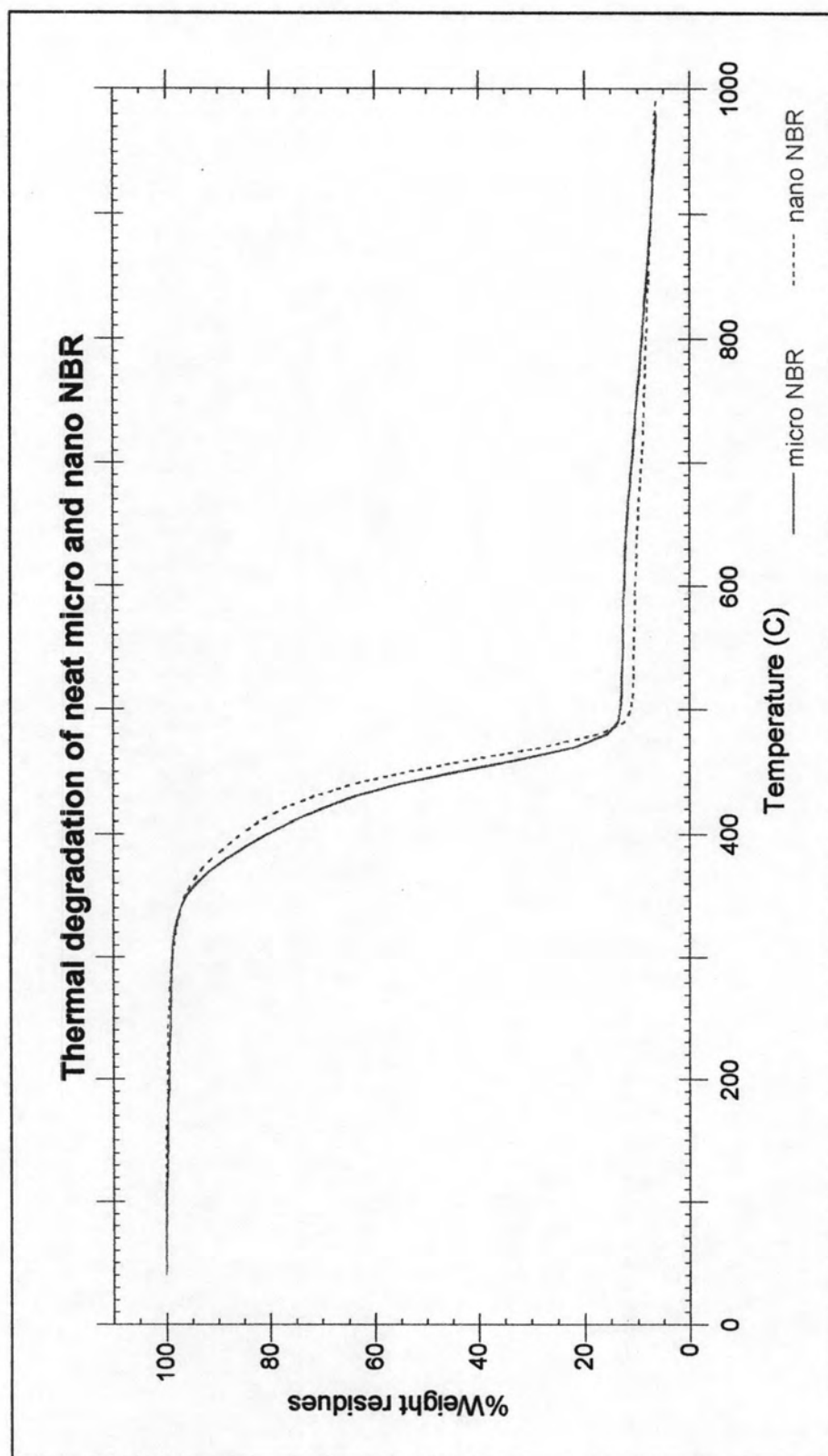
การแสดงผลการเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่เติมยาง NBR ทั้งขนาดอนุภาคไมโครและนาโน เทียบกับการเสื่อมสลายขององค์ประกอบอื่นๆ ในผ้าเบรก ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบพฤติกรรมการเสื่อมของผ้าเบรกที่ผสมยางไมโครและยางนาโนที่ปริมาณยาง NBR ตั้งแต่ 1.2% ถึง 2.2% พบว่า ผ้าเบรกยาง NBR ต่างมีลักษณะของ TGA scan คล้ายกัน โดยผ้าเบรกยางไมโครเริ่มเกิดการสลายตัว ที่อุณหภูมิ 190°C จากการเสื่อมของ additive ที่เติมลงในยาง NBR เมื่ออุณหภูมิผ้าเบรกสูงขึ้นไปถึง 240°C พบว่า ผ้าเบรกยางไมโครมีการหายไปของน้ำหนักมากขึ้น ซึ่ง อนุภาคอุณหภูมินี้ friction dust ซึ่งเป็นองค์ประกอบในผ้าเบรกเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 260°C ผ้าเบรกยาง NBR ไมโครมีการเสื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ยาง NBR ไมโคร เกิดการเสื่อมสลาย ที่อุณหภูมิ 360°C ฟีนอลิกเรซินซึ่งเป็นสารยึดติดในผ้าเบรกเกิดการเสื่อมอย่างรวดเร็ว ทำให้ผ้าเบรกยาง NBR ไมโครมีการเสื่อมสลายเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 400°C friction dust เกิดการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิผ้าเบรกเพิ่มขึ้นเป็น 450°C พบว่า การเสื่อมสลายของเส้นใยอะรามิกและ friction dust เกิดการเสื่อมสลายที่ช้าลง ทำให้ผ้าเบรกยาง NBR ไมโครมีการเสื่อมที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิ 450 - 500°C เมื่ออุณหภูมิของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นเป็น 490°C อนุภาคอุณหภูมินี้ ยาง NBR ไมโคร แทบไม่เกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง NBR เกิดการเสื่อมสลายไปหมด คงเหลือแต่ additive ในยางไมโคร เมื่อผ้าเบรกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 540°C อนุภาคอุณหภูมินี้ friction dust เกิดการเสื่อมจนหมด จนกระทั่งอุณหภูมิผ้าเบรกเพิ่มขึ้นเป็น 570°C ฟีนอลิก และเส้นใยอะรามิกในผ้าเบรกเกิดการเสื่อมสลายไปหมดเช่นกัน และเมื่ออุณหภูมิของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นต่อไปอีก มีเพียง additive ในยาง NBR ไมโคร เท่านั้นที่ยังคงเกิดการสลายตัวต่อไปแต่ในปริมาณที่เล็กน้อย จนกระทั่งผ้าเบรกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 800°C พบว่า ผ้าเบรกยางไมโครเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งอาจจะเกิดจากองค์ประกอบอื่นๆ ในผ้าเบรก ซึ่งทางผู้ผลิตมิได้เปิดเผยให้ทราบ อนุภาคอุณหภูมินี้ พบว่าผ้าเบรกยางไมโครที่ปริมาณยางต่างๆ มีน้ำหนักเหลืออยู่ราว 76-77% โดยผ้าเบรกยางไมโคร 1.8% โดยน้ำหนัก มีน้ำหนักเหลืออยู่มากที่สุด ตามด้วย 1.6, 2.0, 2.2 และ 1.2% โดยน้ำหนัก โดยผ้า

เบรกที่มีปริมาณยาง NBR ไมโคร 2.0% โดยน้ำหนัก มีน้ำหนักเหลือน้อยที่สุดเพียง 75% หมายความว่าผ้าเบรกยาง NBR ไมโคร 1.8%

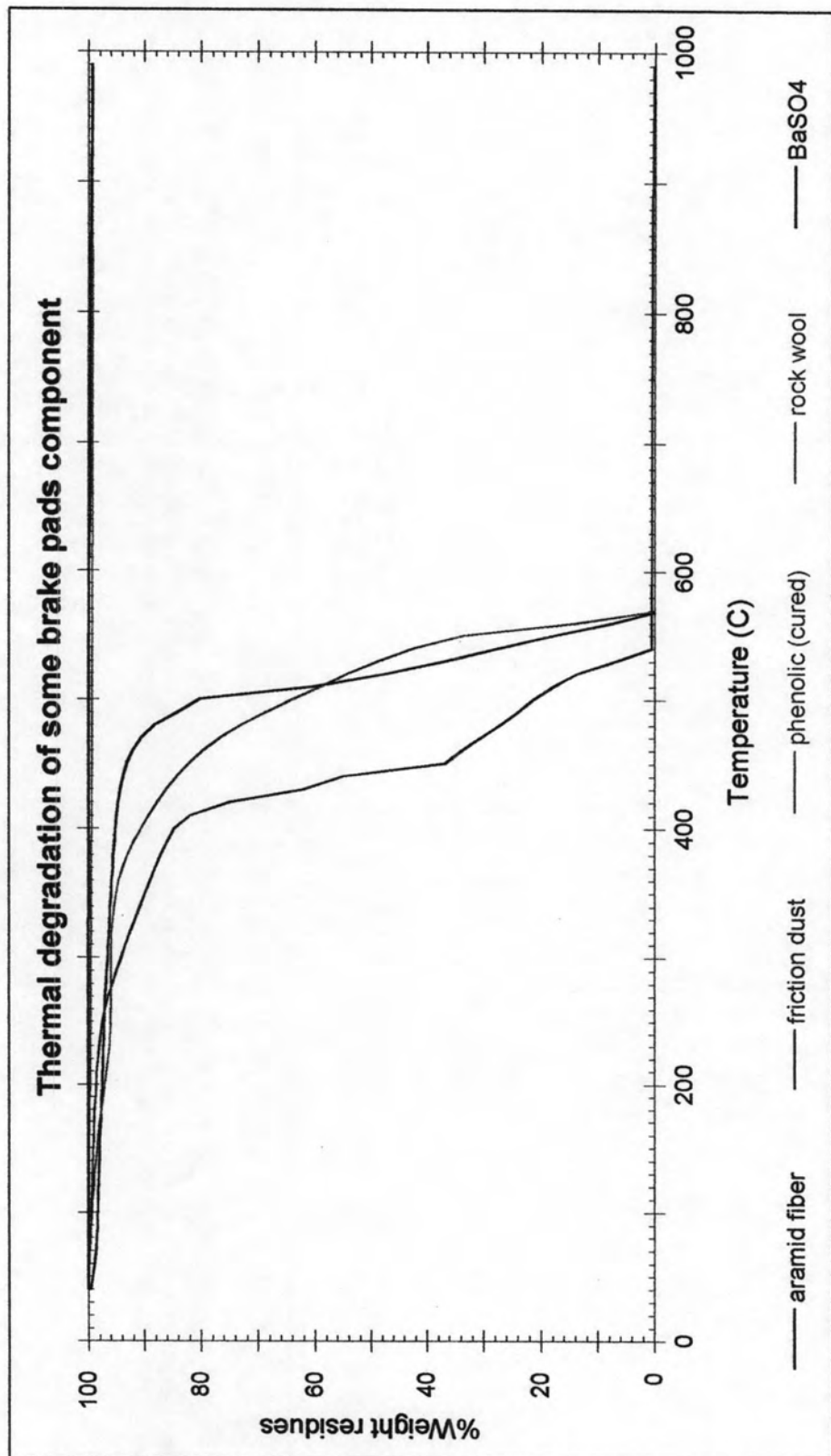
การพิจารณาการเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่เติมยาง NBR นาโน ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 พบว่า ผ้าเบรกยางนาโน เริ่มเกิดการสลายตัว ที่อุณหภูมิ 190°C จากการเสื่อมของ additive ที่เติมลงในยาง NBR เช่นเดียวกับยาง NBR ไมโคร เมื่ออุณหภูมิผ้าเบรกสูงขึ้นถึง 240°C พบว่า ผ้าเบรกยาง NBR นาโน มีการเสื่อมมากขึ้น เนื่องจาก ณ อุณหภูมินี้ friction dust ซึ่งเป็นองค์ประกอบในผ้าเบรกเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 320°C ผ้าเบรกยาง NBR นาโนมีการเสื่อมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ยาง NBR นาโน เกิดการเสื่อม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 360°C ฟีนอลิกเรซินซึ่งเป็นสารยึดติดในผ้าเบรกเกิดการเสื่อมอย่างรวดเร็ว ทำให้ผ้าเบรกยาง NBR นาโนมีการเสื่อมเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 400°C friction dust มีการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิผ้าเบรกเพิ่มเป็น 450°C พบว่า มีการเสื่อมสลายของเส้นใยอะรามิดและ friction dust มีการเสื่อมที่ช้าลง ทำให้ผ้าเบรกยาง NBR นาโนมีการเสื่อมที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิ 450 - 500°C เมื่ออุณหภูมิของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นเป็น 500°C ณ อุณหภูมินี้ ยาง NBR นาโน เกิดการเสื่อมสลายไปหมด คงเหลือแต่ additive ในยางนาโน เมื่อผ้าเบรกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 540°C ณ อุณหภูมินี้ friction dust เกิดการเสื่อมจนหมด จนกระทั่งอุณหภูมิผ้าเบรกเพิ่มขึ้นเป็น 570°C ฟีนอลิก และเส้นใยอะรามิดในผ้าเบรกเกิดการเสื่อมสลายไปหมดเช่นกัน และเมื่ออุณหภูมิของผ้าเบรกเพิ่มขึ้นต่อไปอีกมีเพียง additive ในยาง NBR นาโน เท่านั้นที่ยังคงเกิดการสลายตัวต่อไปแต่ในปริมาณที่เล็กน้อย จนกระทั่งผ้าเบรกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 800°C พบว่า ผ้าเบรกยางนาโนเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งอาจจะเกิดจากองค์ประกอบอื่นๆ ในผ้าเบรก ซึ่งทางผู้ผลิตมิได้เปิดเผยให้ทราบ เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1,000°C พบว่าผ้าเบรกยาง NBR นาโนมีน้ำหนักเหลืออยู่ 79.5%, 79%, 78%, 77% และ 76.5% สำหรับผ้าเบรกยางนาโนที่มีปริมาณยาง NBR 2.0%, 1.6%, 1.8% และ 1.2%, 2.2% และ 1.4% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

พิจารณาการเสื่อมสลายของผ้าเบรกยางไมโครและยางนาโน แสดงดังในรูปที่ 4.28 พบว่า ผ้าเบรกยางนาโน ปริมาณ 1.2% โดยน้ำหนัก มีการเสื่อมสลายน้อยกว่าผ้าเบรกยางไมโครที่ปริมาณยางเดียวกัน ที่ทุกช่วงอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 1000°C ผ้าเบรกยางนาโนมีน้ำหนักเหลืออยู่ 78% ซึ่งมากกว่ายางไมโครซึ่งเหลืออยู่ 76.5% พิจารณาผ้าเบรก NBR 1.4% พบว่า ในช่วงแรกผ้าเบรกยางไมโครและยางนาโนที่มีปริมาณยาง 1.4% โดยน้ำหนัก มีการเสื่อมสลายใกล้เคียงกัน จนเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 300°C ผ้าเบรกยางนาโนมีการสลายตัวที่น้อยกว่า จนกระทั่งที่อุณหภูมิมากกว่า 900°C ผ้าเบรกยางไมโครและยางนาโนมีการเสื่อมสลายที่ใกล้เคียงกัน โดยที่อุณหภูมิ 1000°C ผ้า

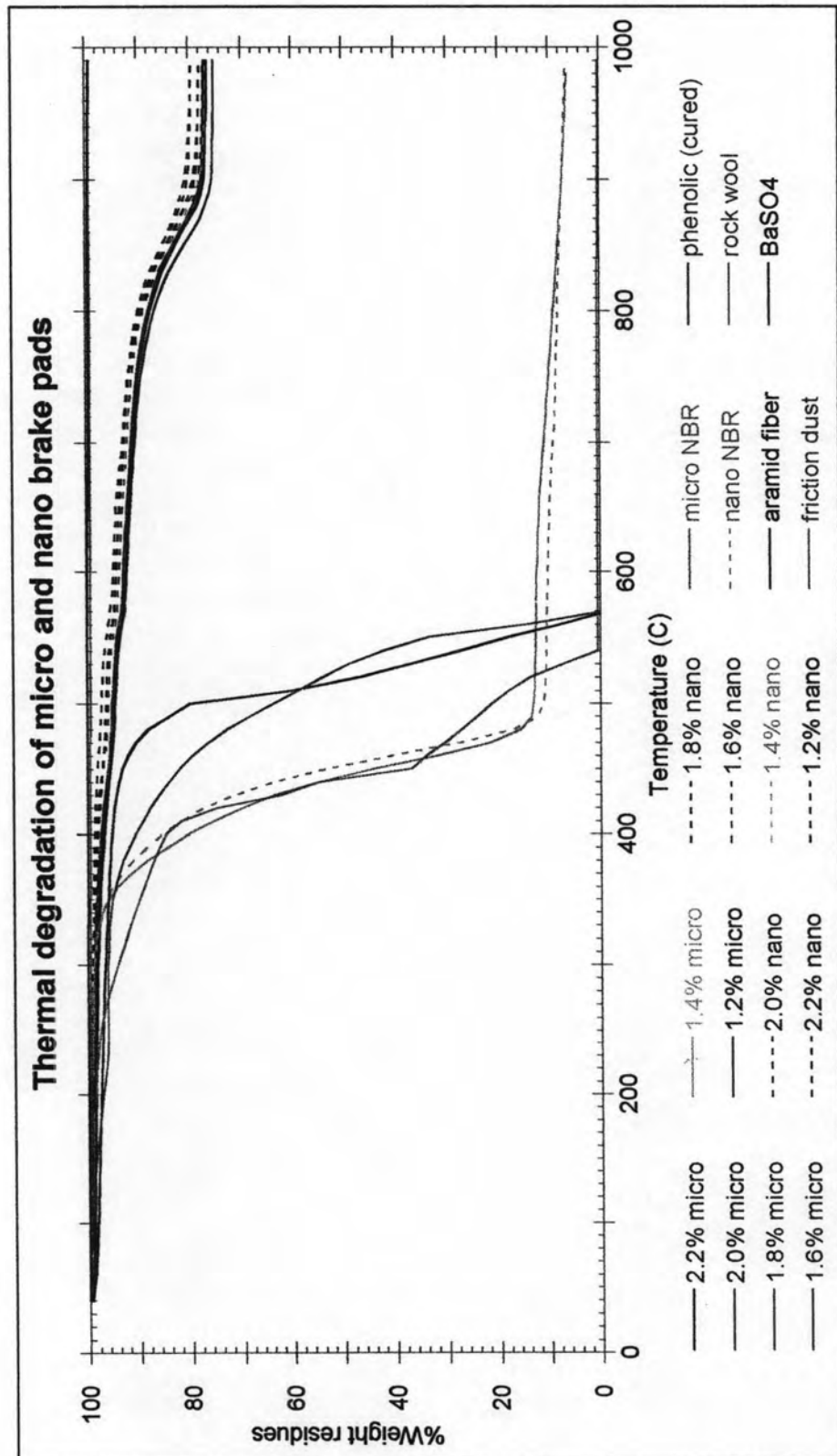
เบรคทั้งสองมีน้ำหนักเหลืออยู่ 76.5% พิจารณาผ้าเบรคยางไมโครและยางนาโนที่ปริมาณยาง 1.6% โดยน้ำหนัก มีการเสื่อมสลายของผ้าเบรคที่ใกล้เคียงกันในช่วงคอนตัน จนกระทั่งอุณหภูมิกว่า 300°C เป็นต้นไป พบว่า ผ้าเบรคยางนาโนมีการเสื่อมสลายที่น้อยกว่าผ้าเบรคยางไมโคร เมื่ออุณหภูมิถึง 1000°C ผ้าเบรคยางนาโนมีปริมาณเหลืออยู่ 79% และ 76.5% โดยน้ำหนัก สำหรับผ้าเบรคยางไมโคร การเสื่อมสลายของผ้าเบรคยางไมโครและนาโน 1.6% พบว่า ช่วงอุณหภูมิ 100 - 300°C ผ้าเบรคยางนาโนที่มีปริมาณยาง 1.8% โดยน้ำหนักมีการเสื่อมสลายของผ้าเบรคใกล้เคียงกัน เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°C ผ้าเบรคยางนาโนมีการเสื่อมสลายที่น้อยกว่า จนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 1000°C ผ้าเบรคยางนาโนมีน้ำหนักเหลืออยู่ 78% โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักผ้าเบรคยางไมโครเหลืออยู่ 77% โดยน้ำหนัก แสดงการเสื่อมสลายของผ้าเบรคยางไมโครและยางนาโนที่ปริมาณ 2.0% โดยน้ำหนัก พบว่าช่วงเริ่มที่อุณหภูมิ การเสื่อมสลายของผ้าเบรคยางไมโครและยางนาโนมีการเสื่อมสลายที่ใกล้เคียงกัน จนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 200°C เป็นต้น ผ้าเบรคยางนาโนมีการเสื่อมสลายน้อยกว่าผ้าเบรคยางไมโคร จนถึงที่อุณหภูมิ 1000°C ผ้าเบรคยางนาโนเหลืออยู่ 79.5% โดยน้ำหนัก และมีปริมาณผ้าเบรคยางไมโครเหลืออยู่ 75% โดยน้ำหนัก พิจารณาการเสื่อมสลายของผ้าเบรคยางไมโครและยางนาโนที่ปริมาณยาง 2.2% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า ผ้าเบรคยางนาโนมีการเสื่อมสลายน้อยกว่าผ้าเบรคยางไมโครตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 100 - 830°C หลังจากนั้นผ้าเบรคยางทั้งสองมีการเสื่อมสลายที่เท่ากันในช่วงอุณหภูมิ 830 - 870°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผ้าเบรคยางนาโนกลับมีการเสื่อมสลายน้อยกว่าผ้าเบรคยางไมโครอีกครั้ง จนถึงอุณหภูมิ 1000°C พบว่ามีผ้าเบรคยางนาโนเหลืออยู่ 77% โดยน้ำหนัก และผ้าเบรคยางไมโครเหลืออยู่ 66.5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นเห็นได้ว่าผ้าเบรคยางไมโครมีการเสื่อมสลายของผ้าเบรคน้อยกว่าผ้าเบรคยางไมโครในทุกๆ สัดส่วนปริมาณยาง



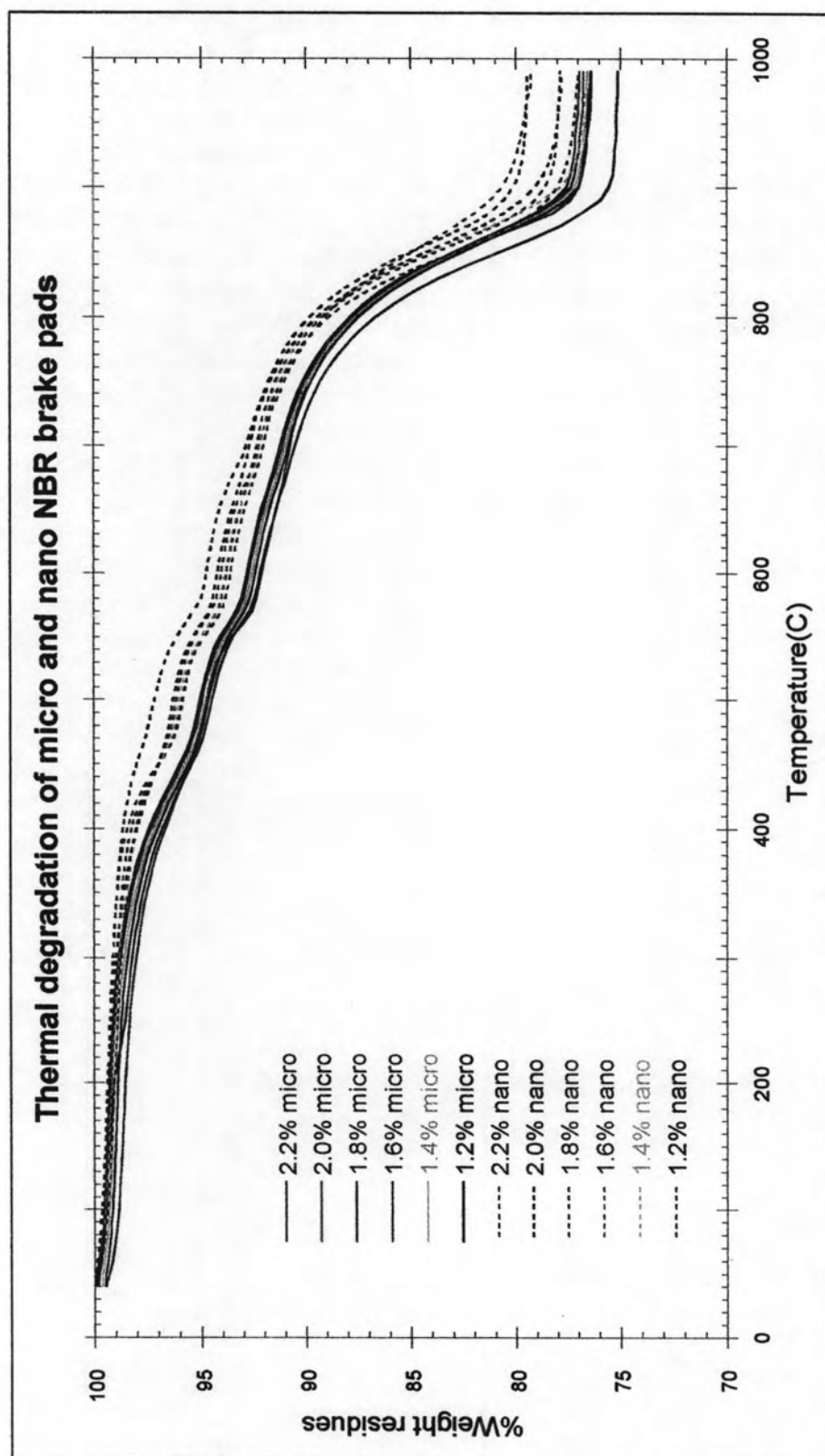
รูปที่ 4.25 การเสื่อมสลายของยาง NBR อนุภาคขนาดไมโครและนาโน



รูปที่ 4.26 การเสื่อมสลายขององค์ประกอบบางชนิดในผ้าเบรก



รูปที่ 4.27 การเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและนาโนที่ปริมาณต่างๆ เทียบกับยาง NBR ไมโครและนาโน และองค์ประกอบอื่นๆ



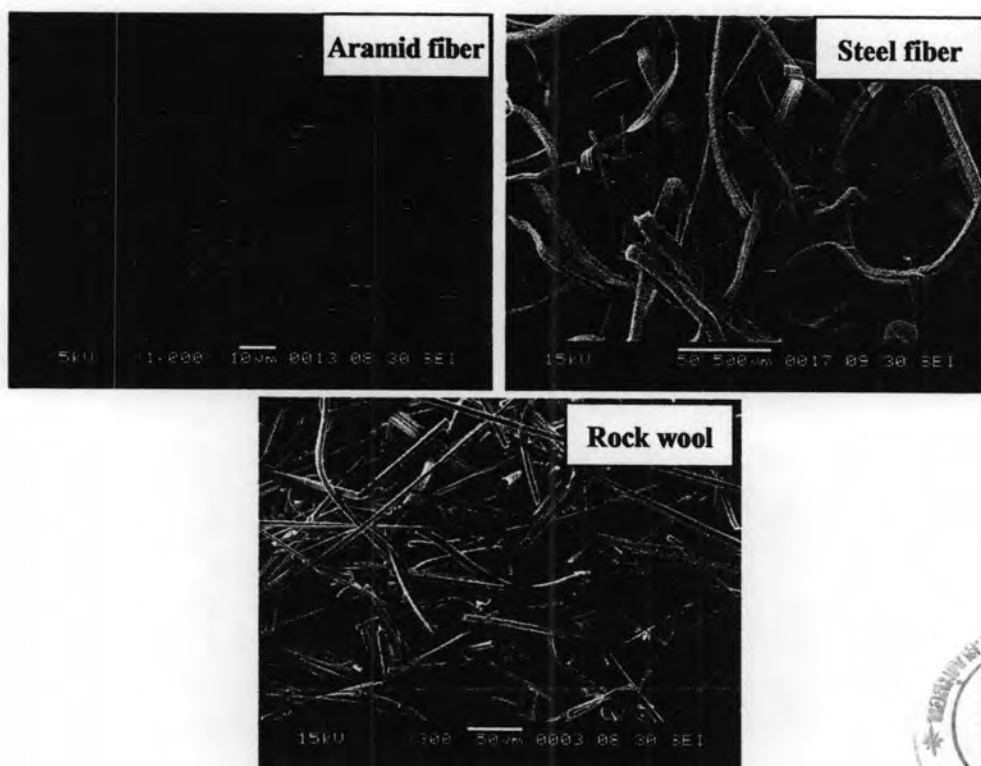
รูปที่ 4.28 การเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร และยาง NBR นาโน ที่ปริมาณต่างๆ

4.10 การศึกษาโครงสร้างผ้าเบรกในระดับจุลภาค

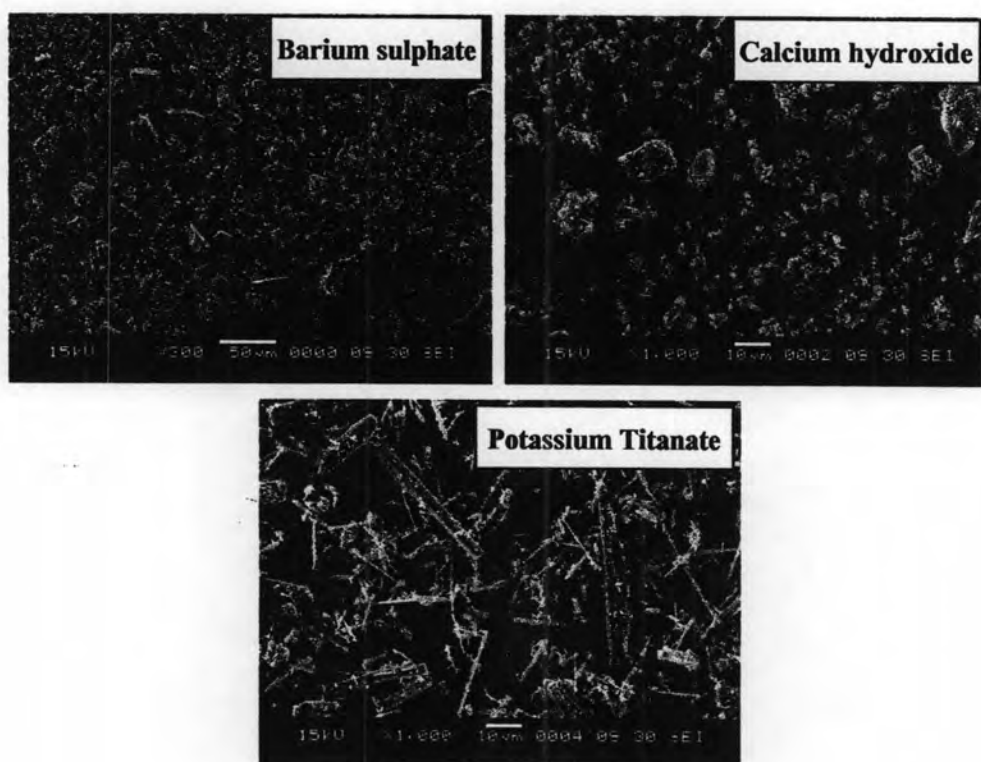
การศึกษาลักษณะองค์ประกอบโครงสร้างผ้าเบรก และการกระจายตัวของอนุภาคยาง NBR ทั้งขนาดไมโครและนาโนในผ้าเบรก ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ลักษณะองค์ประกอบต่างๆ ที่เติมลงในผ้าเบรก ดังแสดงรูปที่ 4.29 – 4.35 แสดงลักษณะของผง Antimony ผงทองแดง เส้นใยอะรามิด เส้นใยโลหะ ไฮทิน $BaSO_4$ $Ca(OH)_2$ Zirconium Titanate ผง friction dust, Synthetic Graphite, Zirconium silicate, Carbon Black และฟีนอลิกเรซิน พบว่า องค์ประกอบเหล่านี้มีทั้งเป็นเส้นใยและอนุภาคขนาดต่างๆ เฉลี่ยในระดับไมครอน รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะอนุภาคของยาง NBR ขนาดไมโครและนาโน ขนาดของอนุภาคยางนาโนมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคยาง NBR ไมโคร และองค์ประกอบอื่นๆ ในผ้าเบรกเป็นพันเท่า รูปที่ 4.37 และ 4.38 เป็นภาพขยายแสดงโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโครและยาง NBR นาโนในปริมาณเท่ากัน พบว่าผ้าเบรกเป็นผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งที่มีโครงสร้างซับซ้อน องค์ประกอบมีทั้งรูปแบบเป็นเส้นใย ก้อนผลึก ผงอนุภาค กระจายตัวฝังอยู่ในหรือเกาะอยู่บน Matrix ที่เป็นฟีนอลิก ซึ่งยึดองค์ประกอบต่างๆ ไว้ด้วยกัน ทำให้ไม่สามารถเห็นอนุภาคยาง NBR ไมโครได้เนื่องจากการถูกบังโดยอนุภาคขององค์ประกอบอื่นๆ สำหรับอนุภาคยาง NBR นาโนซึ่งมีขนาดเล็ก พบมีการกระจายตัวอยู่ในเนื้อผ้าเบรกอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ เนื่องจากไม่มีองค์ประกอบอื่นใดของผ้าเบรกที่มีขนาดเล็กถึงขนาดนาโน



รูปที่ 4.29 ลักษณะขององค์ประกอบที่เป็นโลหะที่เติมลงในผ้าเบรก



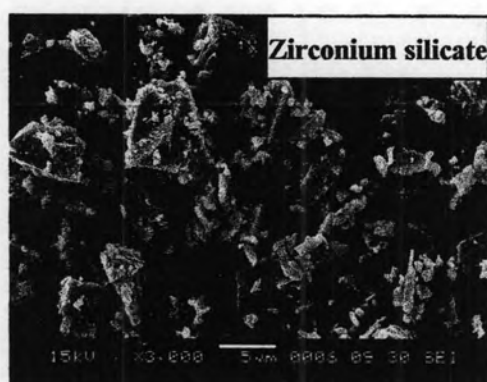
รูปที่ 4.30 ลักษณะขององค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นเส้นใยในผ้าเบรก



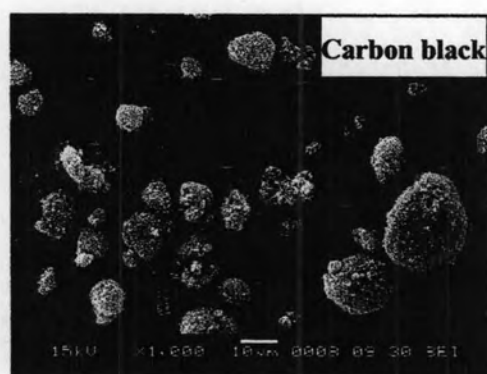
รูปที่ 4.31 ลักษณะของสารตัวเติมที่เติมในผ้าเบรก



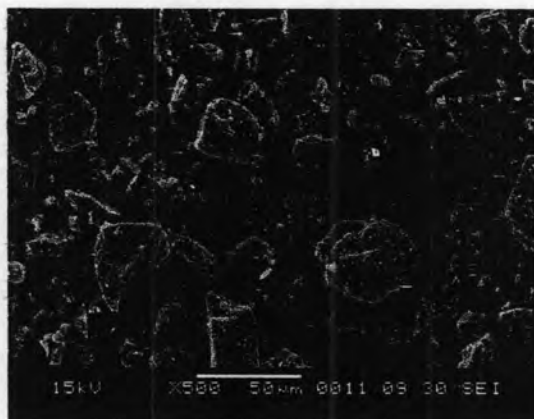
รูปที่ 4.32 ลักษณะขององค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในผ้าเบรก



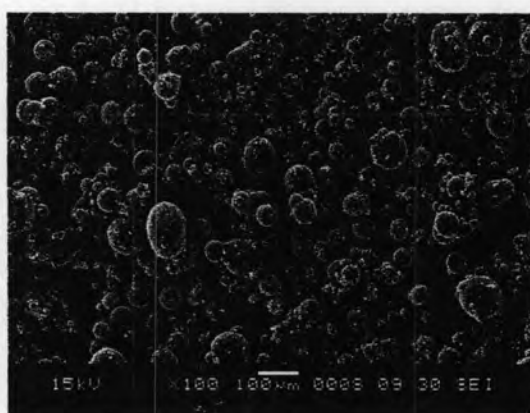
รูปที่ 4.33 ลักษณะขององค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นผงขัดในผ้าเบรก



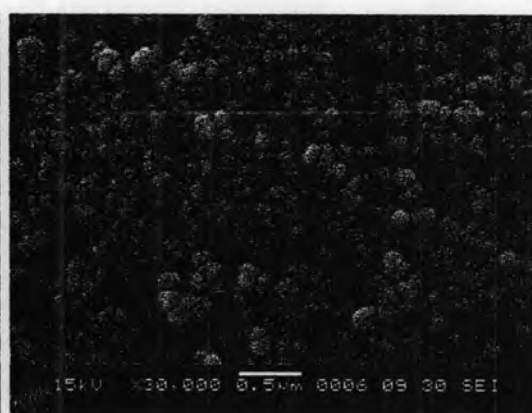
รูปที่ 4.34 ลักษณะของ Carbon black



รูปที่ 4.35 ลักษณะของฟีนอลิกเรซิน



(ก) ยาง NBR ไมโคร

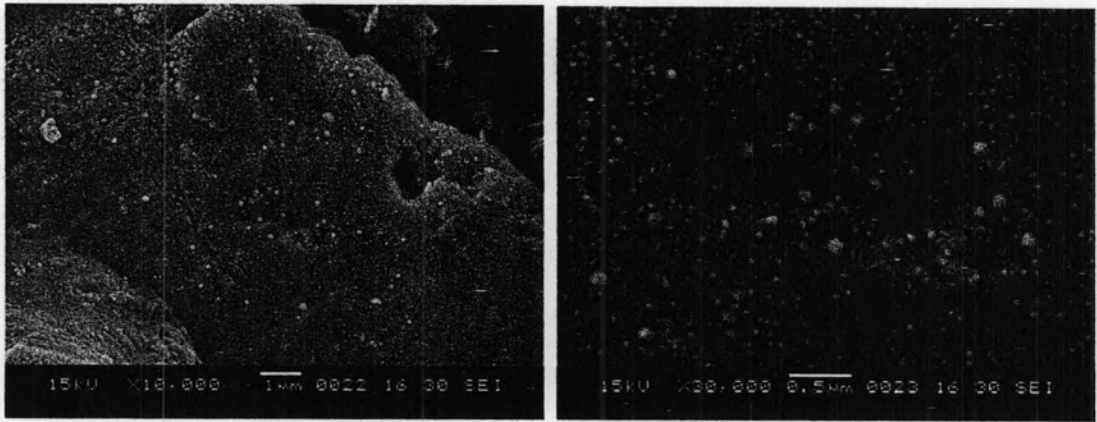


(ข) ยาง NBR นาโน

รูปที่ 4.36 ลักษณะอนุภาคยาง NBR



รูปที่ 4.37 โครงสร้างของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR ไมโคร



รูปที่ 4.38 โครงสร้างของผ้าเบรกที่ผสมยาง NBR นาโน

4.11 สรุปการเปลี่ยนแปลงของผ้าเบรกหลังการปรับปรุงด้วยผงยาง NBR อนุภาคขนาดนาโน

สมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และการเสื่อมสลายของผ้าเบรกที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยผงยาง NBR อนุภาคขนาดนาโน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติที่เปลี่ยนไปของผ้าเบรกภายหลังการเติมยาง NBR ทั้งขนาดไมโครและนาโน

รายการที่เปลี่ยน	ระดับการเปลี่ยนแปลง	
	มาก	เล็กน้อย
เปลี่ยนจากยาง NBR ไมโคร เป็นยาง NBR นาโน	+ การทนต่อการคัดโค้ง	- ความแข็ง - การต้านแรงเฉือน - อัตราการสึก - ปริมาณการสึก + ความพรุน + สมบัติการทนต่อแรงกระแทก
ปริมาณยาง NBR เพิ่มขึ้น (ทั้งไมโครและนาโน)	+ การทนต่อการคัดโค้ง - อัตราการสึก - ปริมาณการสึก	+ ความแข็ง + ความถ่วงจำเพาะ + การต้านแรงเฉือน + ความพรุน + สมบัติการทนต่อแรงกระแทก

+ ดีขึ้น - ค่อยลง

พิจารณาสมบัติของผ้าเบรกยาง NBR เมื่อเปลี่ยนมาใช้ยาง NBR อนุภาคขนาดนาโนแทนไมโคร พบว่า แรงเสียดทานและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานยังมีแนวโน้มที่ไม่แน่ชัด โดยระดับแรงเสียดทานและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของผ้าเบรกที่ใช้ยาง NBR นาโน 1.6% และ 2.0% มีระดับแรงเสียดทานและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเสถียรที่สุด แต่ก็อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 250 - 300°C เท่านั้น ในช่วงอุณหภูมิต่ำตั้งแต่ 100 - 200°C ระดับแรงเสียดทานมีระดับไม่เสถียรและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกล ดังแสดงในตารางที่ 4.1 สมบัติการทนต่อการคัดโค้งดีขึ้นมาก ระดับความพรุนและสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของผ้าเบรก NBR นาโน ดีขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ความแข็ง การต้านแรงเฉือน อัตราการสึก การสึกมีประสิทธิผลลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณยาง NBR ทั้งอนุภาคขนาดไมโครและนาโนในผ้า

เบรกเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ สมบัติการทนต่อการตัด โค้งของผ้าเบรคดีขึ้น แต่อัตราการสึกและปริมาณการสึกเพิ่มขึ้นเนื่องจากผ้าเบรคนี้มันขึ้น สมบัติการทนต่อแรงกระแทก ระดับความพรุน การต้านแรงเฉือน ความถ่วงจำเพาะ และความแข็งของผ้าเบรคดีขึ้นเล็กน้อย

การเปรียบเทียบสมบัติของผ้าเบรคยาง NBR ไมโครและยาง NBR นาโนที่ปริมาณยางต่างๆ ดังแสดงสรุปในตารางที่ 4.2 สำหรับผ้าเบรคที่ใส่ยาง NBR ไมโครด้วยกัน พบว่า การใส่ยาง NBR 1.6 และ 1.8% โดยน้ำหนัก ทำให้ผ้าเบรคมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด แต่สำหรับผ้าเบรคที่ใส่ยาง NBR นาโน พบว่าการใส่ยาง NBR นาโน 2.0% โดยน้ำหนัก ทำให้ผ้าเบรคมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด รองลงมาคือ ผ้าเบรคยาง NBR นาโน 1.6% แต่หากพิจารณาโดยรวมทั้งหมดผ้าเบรคที่ใส่ยาง NBR นาโน 2.0% โดยน้ำหนักมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณสมบัติและประสิทธิภาพของผ้าเบรคที่ใส่ยาง NBR ไมโครและนาโน ปริมาณยางต่างๆ

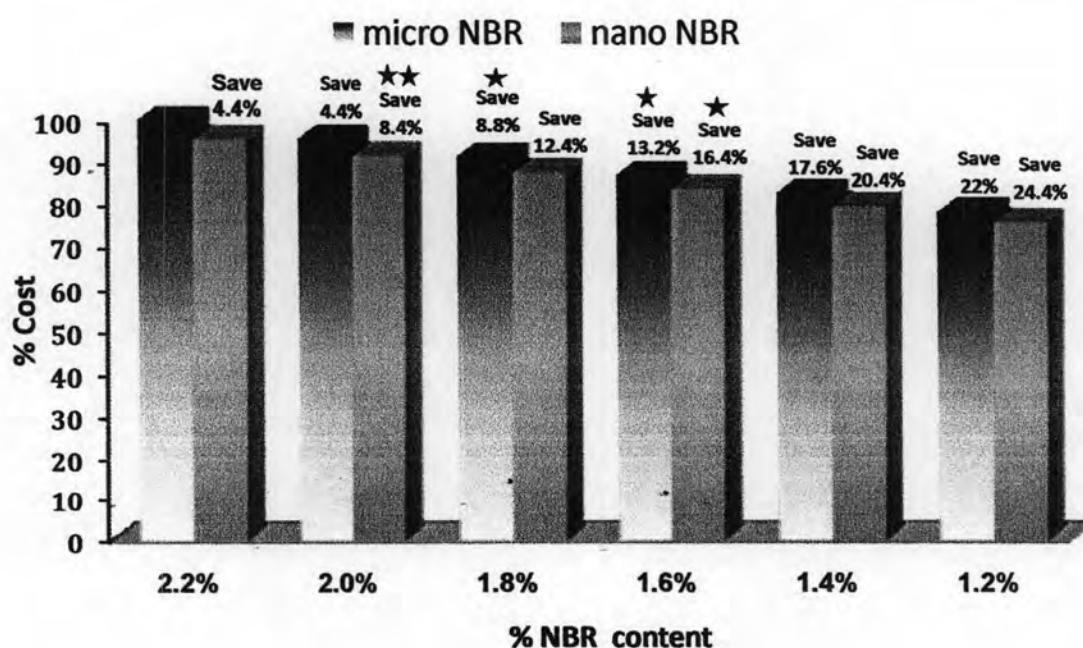
คุณสมบัติ	ปริมาณยาง NBR ในผ้าเบรค											
	1.2%		1.4%		1.6%		1.8%		2.0%		2.2%	
	μ	n	μ	n	μ	n	μ	n	μ	n	μ	n
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	o	-	++	-	+	++	++	-	+	+	+	o
อัตราการสึก	-*	o	+	-	++**	-	++	-*	+	++**	o	+
การสึก	-*	o	++	-	++**	-	++	-*	+	++**	+	+
ความพรุน	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++	+	++
การต้านแรงเฉือน	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o
การทนต่อแรงกระแทก	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+	o	+
คุณสมบัติการตัดโค้ง	o	+	o	+	+	++	+	++	+	++	+	++
การเสื่อมสลาย	+	++	+	+	o	++	+	++	-	++	+	++

* ค่ามากที่สุด **ค่าน้อยที่สุด

++ ดีมาก + ดี o พอใช้ - ค่อนข้าง -- ค่อนข้างมาก

4.12 การประเมินราคาค้นทุนของผ้าเบรคยาง NBR

รูปที่ 4.39 แสดงต้นทุนวัตถุดิบของผ้าเบรคที่ลดลงเมื่อเปลี่ยนจากการใช้ยาง NBR อนุภาคขนาดไมโครเป็นนาโน เพื่อเพิ่มความเหนียวแก่ผ้าเบรค พบว่า ต้นทุนของผ้าเบรคยาง NBR นาโน ต่ำกว่าผ้าเบรค NBR ไมโคร ที่ปริมาณยางเท่ากันทุกสัดส่วน จากรูป ผ้าเบรคยาง NBR นาโน 2.0% ซึ่งมีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด มีต้นทุนที่ต่ำกว่าผ้าเบรคยาง NBR ไมโคร 2.2% ประมาณ 8.4% และต้นทุนใกล้เคียงกับผ้าเบรคยางไมโคร 1.8% ต่อการผสม 100 กิโลกรัม สำหรับผ้าเบรคยาง NBR ไมโคร 1.8%, 1.6% และ ผ้าเบรคยาว NBR นาโน 1.6% ซึ่งมีประสิทธิภาพรองลงมา มีต้นทุนต่อวัตถุดิบ 100 กิโลกรัม ต่ำกว่าผ้าเบรค NBR ไมโคร 8.8%, 13.2% และ 16.4% ตามลำดับ



รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบต้นทุนของผ้าเบรคยาง NBR ที่ปริมาณยางต่างๆ