บทที่ 4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายถึงการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตใส่สารผสมเพิ่มโดยกล่าวถึงการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องและให้แรงกระทำซ้ำเพื่อหาโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และอัตราส่วนของปัวซองสมมูลย์ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ (Crumb rubber asphalt, CRA) และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางพารา (Natural rubber asphalt, NRA) ส่วนสุดท้ายของงานวิจัยจะนำค่าจากการทดสอบมาเปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์

4.2 ผลการทดสอบแอสฟัลต์ใส่สารผสมเพิ่ม

4.2.1 ผลการทดสอบ Penetration

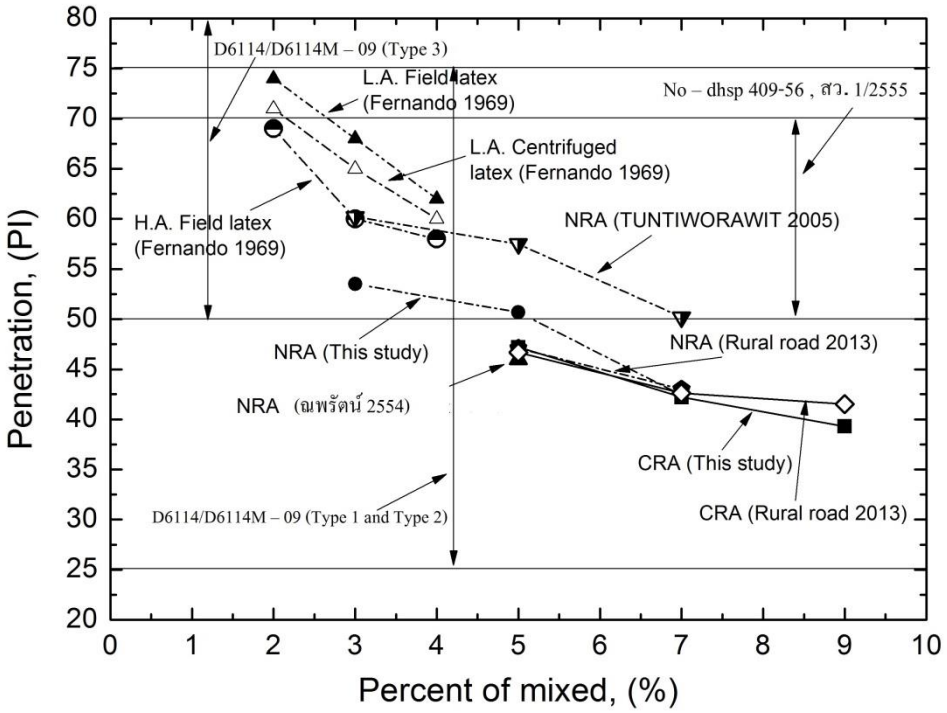
การทดสอบความต้านทานการเจาะทะลุของบีทูมินัสเป็นการวัดความข้นเหลวของยางมะตอยเชิงประจักษ์ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมใช้แบ่งยางมะตอยออกเป็นเกรดมาตรฐานหลายเกรดโดยใช้น้ำหนักเข็ม 100 กรัมปล่อยจมลงในยางมะตอย 5 วินาทีแล้ววัดค่าการเจาะทะลุ ความลึกที่เข็มเจาะลงไปในยางมะตอยให้วัดในหน่วยเพ็น (pen) หรือ 0.1 มม. คือค่าการเจาะลึก (Penetration) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5-94 AASHTO T 49-84 และ มอก.1201-2536

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบ Penetration

	AC 60/70	AC 60/70 ผสมยางพารา 3 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 5 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 5 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 9 %
Penetration	64	53.5	50.7	42.4	47.2	42.4	39.3

จากตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานการเจาะทะลุของบีทูมินัสที่ใส่สารผสมเพิ่มทำให้แอสฟัลต์ AC 60/70 มีค่าความต้านทานการเจาะทะลุที่น้อยลงตามเปอร์เซ็นการใส่สารผสมเพิ่ม (กรมทางหลวงชนบท 2013) การเปลี่ยนแปลงค่าเพนิเทรชันจะลดน้อยลง (จิราภรณ์ ทองศรีนุ่น, 2555) และสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Nuha et al. (2011) และ Peiliang et al. (2013) ที่ได้ทำการทดสอบแล้วพบว่าค่า Penetration ลดลงตามเปอร์เซ็นต์การใส่เศษยางรถยนต์ และเมื่อเปรียบเทียบค่าผลการ

ทดสอบกับผลการทดสอบของ (กรมทางหลวงชนบท, 2013; ณพรัตน์ วิชิตชลชัย, 2554; Fernando และ Nadara, 1969) และข้อกำหนดพิเศษที่ สว.1/2555 ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า Penetration ประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานการเจาะทะลุจากการทดสอบนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบของสถาบันวิจัยยางและผลการทดสอบของกรมทางหลวงชนบทยกเว้นค่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางพาราที่ 5% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบจุดอ่อนตัวที่ได้ค่าที่แตกต่างเช่นกัน แต่ค่ายังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและเมื่อเปรียบเทียบกับของ Fernando และ Nadara (1969) ผลปรากฏว่าค่าของ Fernando และ Nadara (1969) มีค่าที่มากกว่าเหตุผลเพราะตัวยางของ Fernando และ Nadara (1969) ใช้เกรด 80/100 และผสมที่อุณหภูมิ 150 – 163 องศาเซลเซียสโดยใช้น้ำยางข้นปั่นกวนชนิดแอมโมเนียมากและปั่นกวนชนิดแอมโมเนียน้อย (Fernando และ Nadara, 1969) และเทียบกับของ Tuntiworawit et al. (2005) พบว่าค่ามีลักษณะที่ลดลงแบบเดียวกัน ด้านการเปรียบเทียบค่าความต้านทานการเจาะทะลุกับมาตรฐานของ AC 60/70 พบว่าผ่านมาตรฐานของ No – dhsp 401-31 ด้านค่าของ AC 60/70 ผสมยางพาราที่ 5 % ผ่านมาตรฐานของ No – dhsp 409-56 และค่า AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 5 %, 7 % และ 9 % ผ่านมาตรฐานของ ASTM (D6114/D6114M – 09) ประเภท Type 1

และ Type 2 การแบ่งประเภทของมาตรฐานคือแบ่งตามสภาพภูมิอากาศกล่าวคือ Type 1 เหมาะกับใช้ในพื้นที่สภาพอากาศร้อนอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด $43^{\circ}C$ หรือมากกว่านั้นส่วน Type 2 จะมีความอ่อนตัวมากกว่า Type 1 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน $43^{\circ}C$ หรือน้อยกว่านั้นและ Type 3 มีความอ่อนตัวมากที่สุดเหมาะสมที่ไปใช้ในสภาพอากาศหนาวอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน $27^{\circ}C$ หรือน้อยกว่านั้น (ASTM D6114/D6114M – 09)

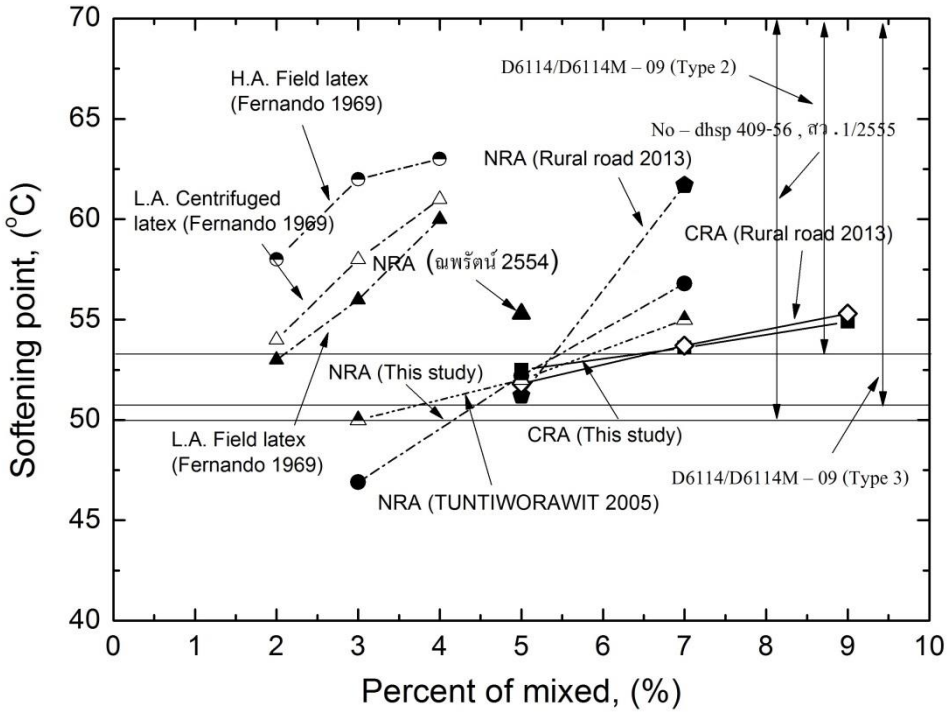
4.2.2 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ (Softening point)

การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูนัสโดยใช้เครื่องมือ Ring and ball จุ่มในน้ำกลั่นแล้วนำลูกเหล็กมาวางไว้บนตัวอย่างจากนั้นเริ่มให้ความร้อนจนลูกเหล็กเลื่อนลงมาที่ระยะทาง 25 มม. จุดอ่อนตัวหมายถึงอุณหภูมิที่วัสดุบิทูเมนอ่อนตัวถึงระดับที่กำหนดภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐานใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 36-86 (Reapproved 1989) AASHTO T 53-84 และมอก. 1216-2537

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบจุดอ่อนตัว

	AC 60/70	AC 60/70 ผสมยางพารา 3 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 5 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 5 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 9 %
จุดอ่อนตัว (^{o}C)	42.9	46.9	52.2	56.8	52.5	53.6	54.9

จากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าการใส่สารผสมเพิ่มในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นที่ใส่สารผสมเพิ่ม (กรมทางหลวงชนบท, 2013) อุณหภูมิที่เป็นจุดอ่อนตัว (Softening Point) จะสูงขึ้น (จิราภรณ์ ทองศรีนุ่น, 2012) และสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Peiliang et al. (2013) ที่ได้ทำการทดสอบแล้วพบว่าค่าจุดอ่อนตัวเพิ่มมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การใส่เศษยางรถยนต์แต่เมื่อแอสฟัลต์มีความแข็งเพิ่มขึ้นอาจจะเสียคุณสมบัติทางด้าน Fatigue และเมื่อเปรียบเทียบค่าผลการทดสอบกับผลการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท สภาบันวิจัยยางและข้อกำหนดพิเศษที่ สว.1/2555 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าจุดอ่อนตัวประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่าค่าของการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบของกรมทางหลวงชนบทยกเว้นค่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางพาราที่ 5 % และ 7 % ของ ฌพรัตน์ วิชิตชลชัย (2554) แต่ทั้งคู่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและเมื่อเปรียบเทียบกับของ Fernando และ Nadara (1969) ผลปรากฏว่าค่าของ Fernando และ Nadara (1969) มีค่าที่มากกว่าเหตุผลเพราะตัวยางที่ใช้ใช้ตัวยางคนละประเภทกันเหตุผลดังที่อธิบายไว้ใน 4.2.1 และเทียบกับของ Tuntiworawit et al. (2005) พบว่าค่ามีที่ใกล้เคียงกัน ด้านผลการเปรียบเทียบค่า AC 60/70 ผสมยางพาราที่ 5 % ผ่านมาตรฐานของ No - dhsp409-56 และค่า AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 3 %, 5 % และ 7 % ผ่านมาตรฐานของ ASTM (D6114/D6114M – 09) ประเภท Type 2 และ Type 3 แสดงถึงเหมาะสำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน 43 $^{\circ}C$ หรือน้อยกว่านั้น ซึ่งผลการทดสอบของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์สอดคล้องกับการทดสอบของ Xiang et al. (2009) ที่ว่าการทดสอบของจุดอ่อนตัวพบว่าค่าของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์มีค่าที่เพิ่มมากขึ้น

4.2.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์คืออัตราส่วนของมวลของวัสดุที่มีปริมาตรตามกำหนดที่อุณหภูมิ 25°C ต่อมวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกันใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 70-82 (Reapproved 1990) และ AASHTO T 228-85

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะ

	AC 60/70	AC 60/70 ผสมยางพารา 3 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 5 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 5 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 9 %
ความถ่วงจำเพาะ	1.030	1.055	1.065	1.085	1.079	1.085	1.097

จากตารางที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่าการใส่สารผสมเพิ่มลงไปจะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากวัสดุที่ใส่ลงไปมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าแอสฟัลต์ AC 60/70 และจะเพิ่มมากขึ้นตามเปอร์เซ็นต์การใส่สารผสมเพิ่มขึ้นด้วย

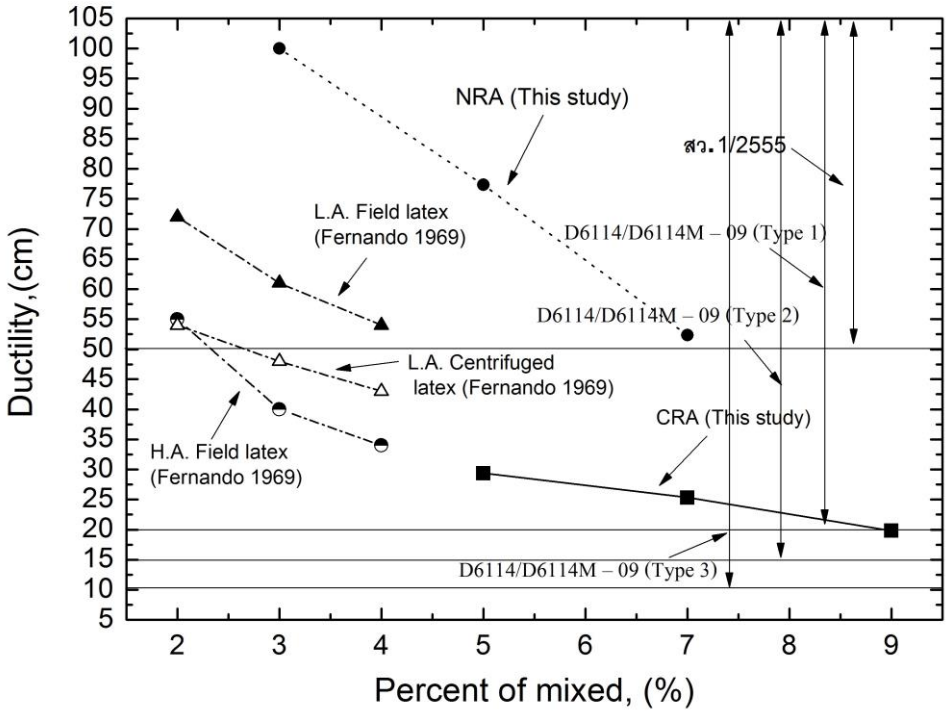
4.2.4 ผลการทดสอบ Ductility

การยืดตัวถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของแอสฟัลต์คือวัสดุจำพวกบิทูมินัสที่กึ่งแข็งความเหนียวเช่นว่านี้เป็นความสามารถยืดหยุ่นได้ภายใต้แรงดึงและด้วยคุณสมบัติข้อนี้จึงทำให้ผิวทางที่ใช้บิทูมินัสเป็นตัวเชื่อมประสานยืดหยุ่นได้และดูดซับแรงกระแทกได้ดี วิธีการทดสอบคือนำตัวอย่างที่ได้รับการหล่อให้เป็นรูปบริเคตตามมาตรฐานภายใต้สภาพที่กำหนดจากนั้นนำไปทดสอบดึงในน้ำอุณหภูมิที่มาตรฐานที่ 25°C ดึงปลายข้างหนึ่งของบริเคตออก โดยความเร็วที่กำหนด 5 ซม./นาที จนกระทั่งยางมะตอยยืดยาวเหมือนเส้นด้ายจนขาดออกจากกัน ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 113-86 (Reapproved 1992) AASHTO T 51-86 และ มอก. 1202-2536

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบยืดตัว Ductility

	AC 60/70	AC 60/70 ผสมยางพารา 3 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 5 %	AC 60/70 ผสมยางพารา 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 5 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 7 %	AC 60/70 ผสมเศษยางรถยนต์ 9 %
Ductility (mm)	100	100	77.33	52.35	29.38	25.32	19.83

จากตารางที่ 4.4 สามารถสรุปได้คือการใส่สารผสมเพิ่มจะทำให้ค่า Ductility ลดลงและการใส่สารผสมเพิ่มยังทำให้ค่าการยืดตัวลดลงตามเปอร์เซ็นการใส่สารผสมเพิ่ม เมื่อเพิ่มปริมาณผงยางรถยนต์ในแอสฟัลต์ค่าความเหนียว (Ductility) จะมีค่าที่ต่ำลง เนื่องจากมีการเพิ่มผงยางรถยนต์มากเกินไปทำให้แอสฟัลต์มีการยึดเกาะกับผงยางรถยนต์ลดลง (ฉัตรวรุณ, 2552) และสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Nuha et al. (2011) และ Peiliang et al. (2013) ที่ได้ทำการทดสอบแล้วพบว่าค่า Ductility ลดลงตามเปอร์เซ็นต์การใส่เศษยางรถยนต์



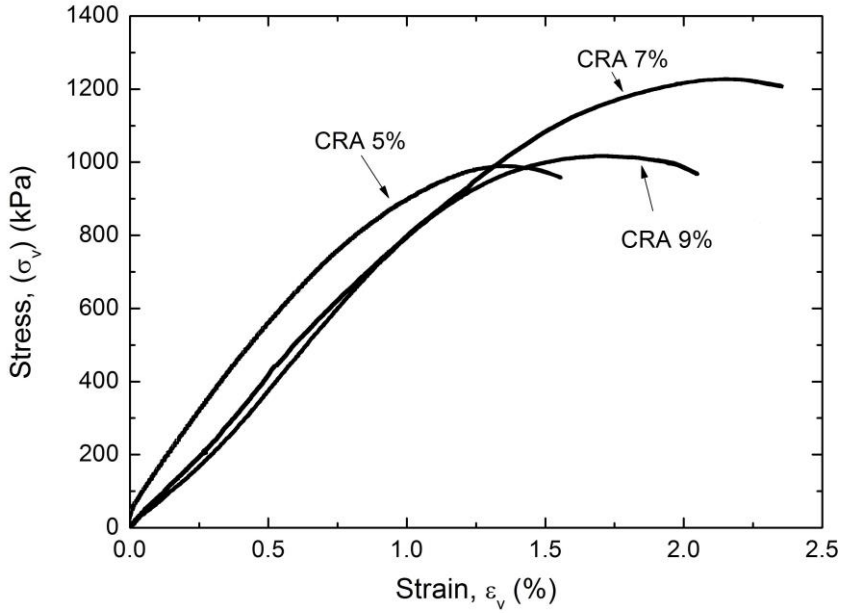
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า Ductility ประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่าค่า (Fernando และ Nadara, 1969) มีค่าอยู่กึ่งกลางระหว่างค่าของแอสฟัลต์ผสมยางพาราและค่าของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์เหตุผลเป็นเพราะตัวยางที่ใช้ใช้ตัวยางคนละประเภทกันเหตุผลดังที่อธิบายไว้ใน 4.2.1 ด้านผลการเปรียบเทียบค่า Ductility ของ AC 60/70 พบว่าผ่านมาตรฐานของ No - dhsp401-31 และค่า Ductility ของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 5 % ผ่านมาตรฐานข้อกำหนดพิเศษที่ สว.1/2555 ของกรมทางหลวงส่วนค่า Ductility ของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 3 %, 5 % และ 7 % ผ่านมาตรฐานของ ASTM D6114/D6114M -09 Type 1 ถึง Type 3

4.3 การทดสอบแบบน้ำหนักกดครั้งเดียว (Monotonic loading)

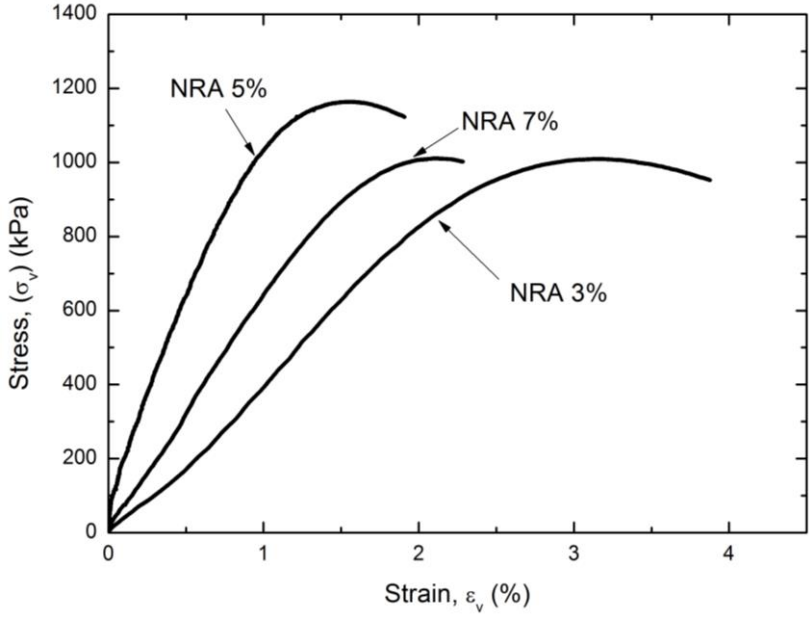
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

รูปที่ 4.4 – 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบการทดสอบครั้งนี้ให้แรงกระทำแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการเคลื่อนตัว ($\dot{\varepsilon}$) คงที่เท่ากับ 0.03 %/นาที ที่ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรของแอสฟัลต์ผสมยางพาราและแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์การผสมต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 3%, 5 % และ 7 % ที่ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

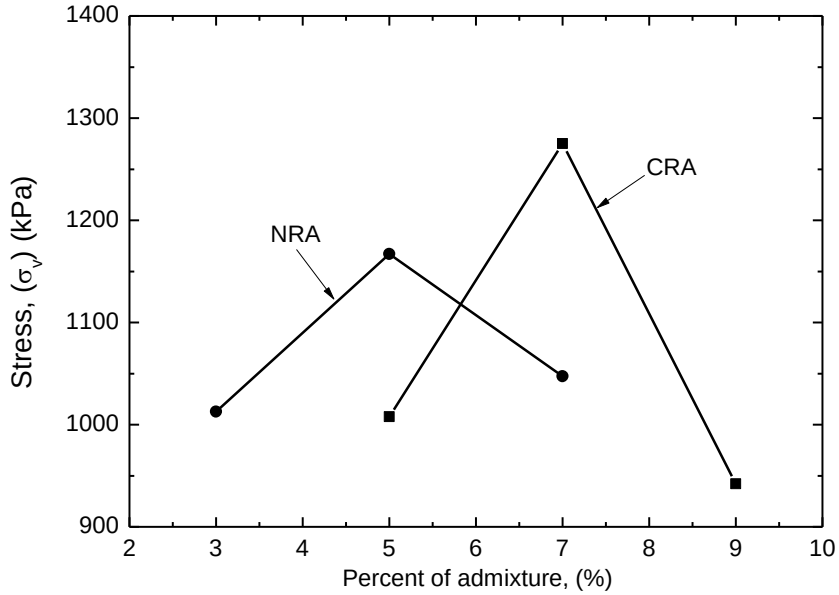
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 7 % มีค่าความเค้นสูงสุดที่มากที่สุดรองลงมาคือแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 5 % และแอสฟัลต์เศษผสมยางรถยนต์ที่ 9 % ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบที่กล่าวมาสอดคล้องกับผลการทดสอบ Marshall ที่แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 7 % มีค่า Stability ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์อื่นๆ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 3 %, 5 % และ 7 % ที่ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 5 % มีค่าความเค้นสูงสุดที่มากที่สุดรองลงมาคือแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 7 % และแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 3 % ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบที่กล่าวมาสอดคล้องกับผลการทดสอบ Marshall ที่แอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 5 % มีค่า Stability ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์อื่นๆ และสอดคล้องกับผลของ (กรมทางหลวงชนบท, 2013) ที่จัดอันดับให้แอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 5 % อยู่อันดับหนึ่งและสถาบันวิจัยยางโดย (ณพรัตน์ วิชิตชลชัย, 2554) ที่อัตราส่วนผสมที่ 5 % เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม

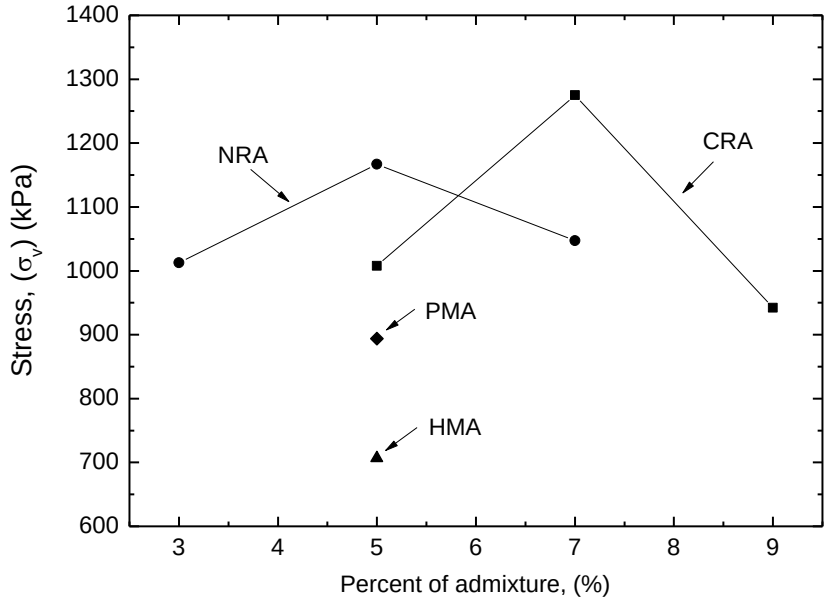
จากรูปที่ 4.4-4.5 สามารถสรุปค่าความเค้นสูงสุดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราและแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าความเค้นสูงสุดของแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้นของแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ที่ 7 % มีค่าความเค้นสูงสุดที่มากที่สุดรองลงมาคือแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 5 %, แอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 7 %, แอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 3 %, แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 5 % และแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ที่ 9 %

เมื่อนำค่าความเค้นของแอสฟัลต์คอนกรีตและโมดิฟายด์โพลิเมอร์แอสฟัลต์ (Kongkitkul et al., 2014) มาเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าความเค้นสูงสุดของแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 สามารถสรุปได้ว่าค่า PMA และ HMA มีค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่า NRA และ CRA ทุกเปอร์เซ็นต์การผสม จากผลการทดสอบพบว่าค่า NRA CRA มีค่ากำลังมากกว่า HMA แสดงได้ว่าการใส่ยางพาราและเศษยางรถยนต์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงแก่แอสฟัลต์

จากผลการทดสอบการให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่องของ NRA และ CRA สรุปได้ว่า

- เปอร์เซ็นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางรถยนต์คือ 7 %
- เปอร์เซ็นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพาราคือ 5 %
- การใส่ยางพาราและเศษยางรถยนต์เป็นสารผสมเพิ่มจะช่วยเพิ่มกำลังแก่แอสฟัลต์

4.4 การทดสอบการให้แรงกระทำซ้ำ (Cyclic loading)

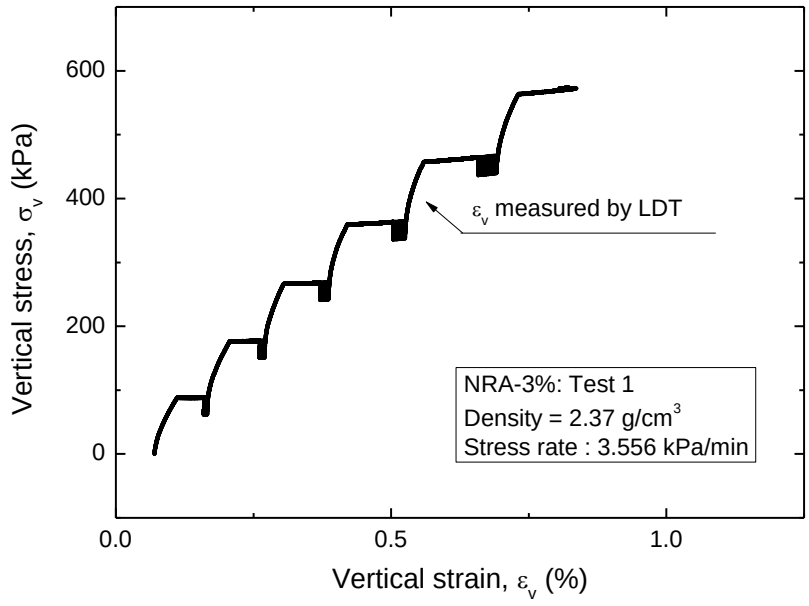
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

รูปที่ 4.8 – 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับตัวอย่างที่มีการบดอัดในแนวตั้งที่ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ เมื่อมีการให้คงค้างแรงกระทำ (SL) ต่อด้วยการให้แรงกระทำซ้ำ (CL) ซึ่งสามารถดูผลการทดสอบทั้งหมดได้ในภาคผนวก ก

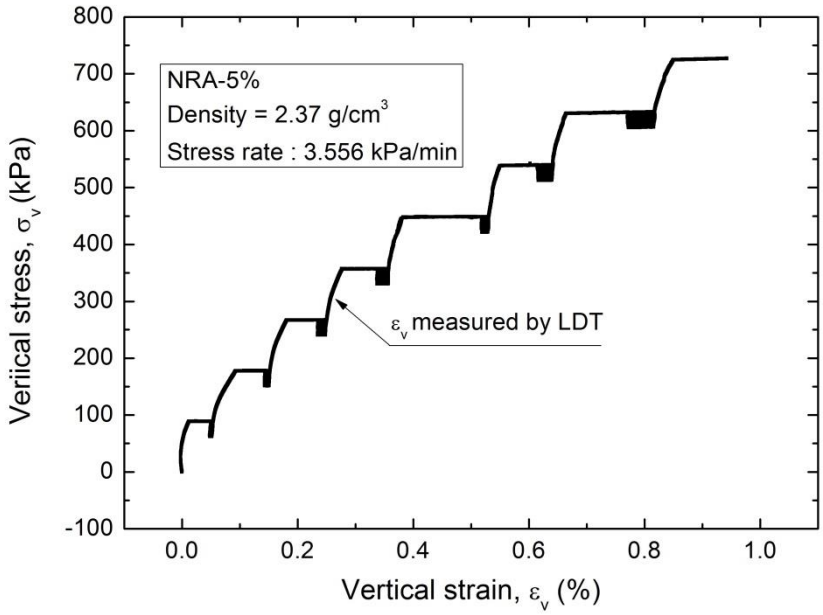
รูปที่ 4.14 – 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่มีการบดอัดในแนวตั้งที่เปอร์เซ็นต์การผสม 3 %, 5 % และ 7 % มีความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรและสำหรับแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่มีการบดอัดในแนวตั้งที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 %,7 % และ 9 % มีความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสามารถดูผลการทดสอบทั้งหมดได้ในภาคผนวก ก

จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.19 จะเห็นได้ว่า

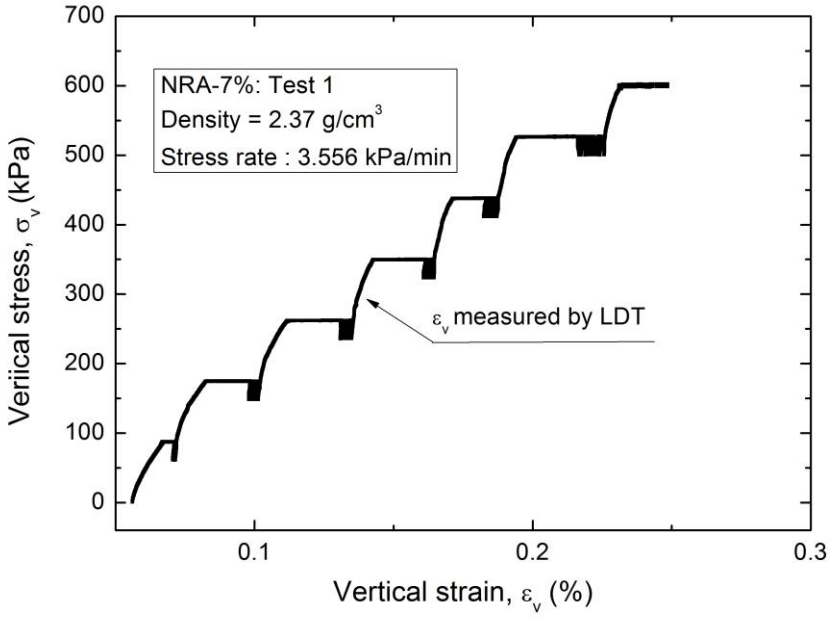
- เมื่อเปรียบเทียบความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการให้แรงกระทำแบบคงแรงกระทำ (Sustaianed loading, SL) และจะให้แรงกระทำซ้ำ (Cyclic loading, CL) ความเครียดที่เกิดขณะ CL จะมีค่าน้อยกว่ามาก จึงอาจกล่าวได้ว่า พฤติกรรมที่เกิดขณะนั้นเป็นแบบอีลาสติกเท่านั้น ดังนั้นคุณสมบัติที่ได้จากงานวิจัยนี้ จึงเป็นแบบอีลาสติกเท่านั้น (Kongkitkul et al., 2014)
- มีการขยายตัวด้านข้างเกิดขึ้นขณะให้แรงกระทำในแนวแกน โดยเฉพาะช่วงที่มีการให้แรงกระทำแบบ SL และ CL (Kongkitkul et al., 2014)
- เมื่อค่าระดับความเค้นเพิ่มมากขึ้นความคืบก็จะเกิดขึ้นมากขึ้นตามระดับความเค้น
- เมื่อค่าระดับความเค้นเพิ่มมากขึ้นการเสียรูปของแอสฟัลต์คอนกรีตก็จะเกิดขึ้นมากขึ้นตามระดับความเค้น



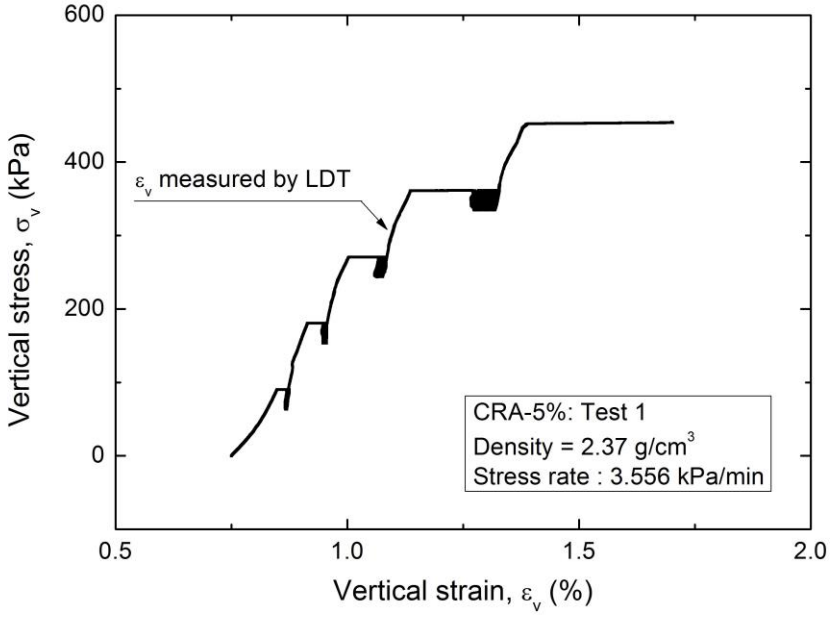
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์การผสม 3 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



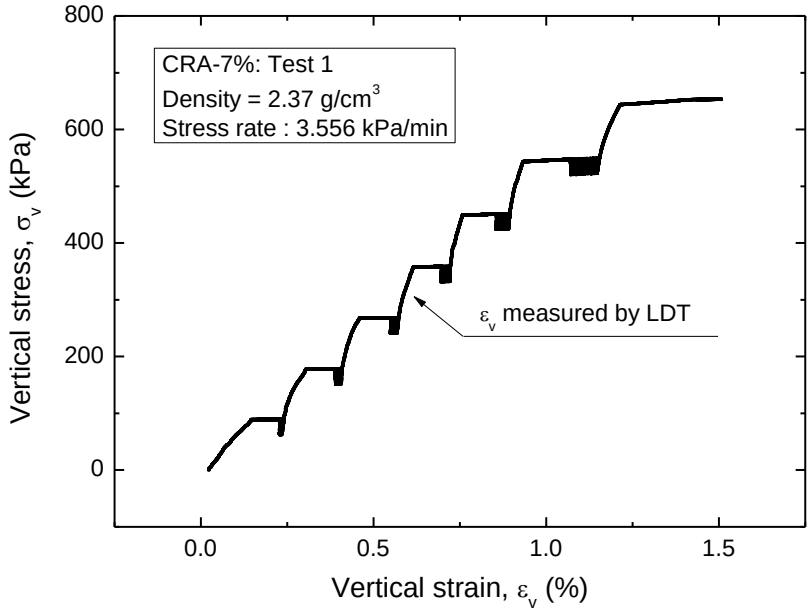
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



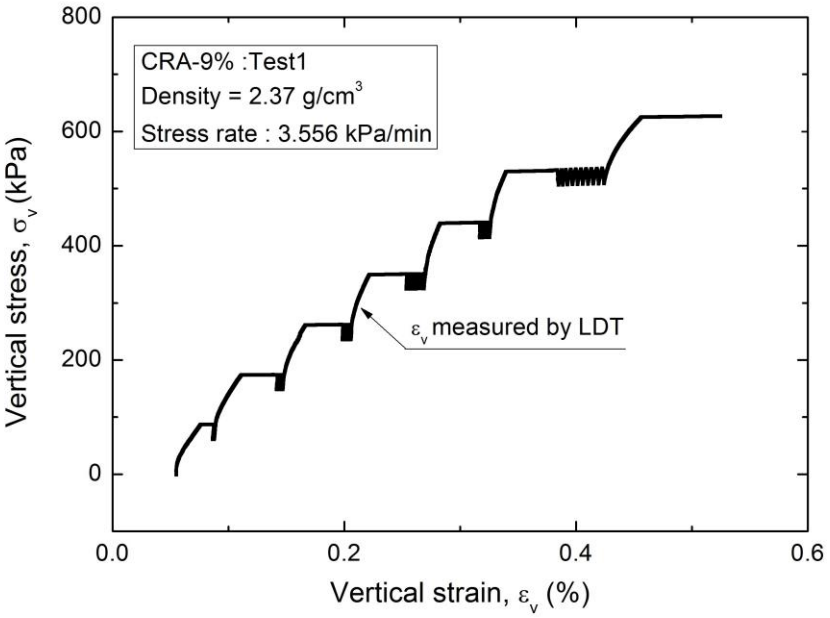
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



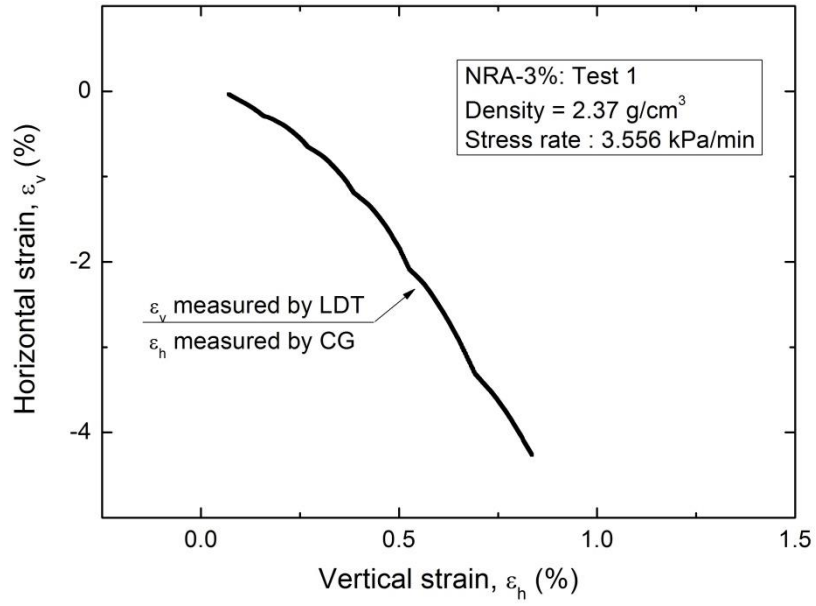
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



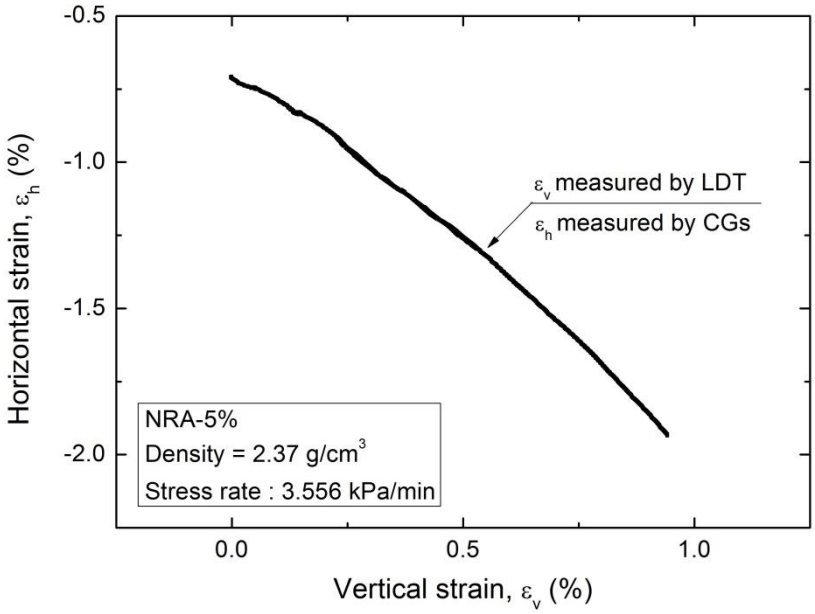
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



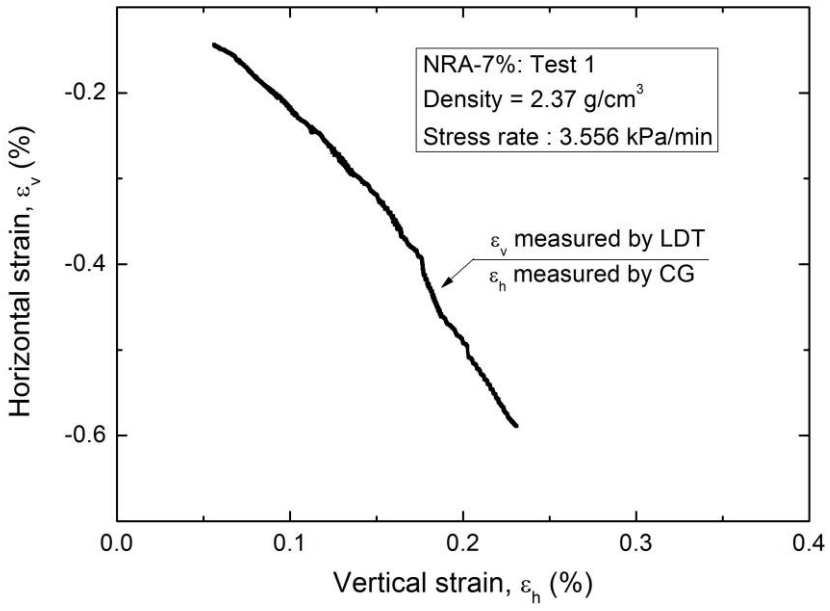
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 9 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



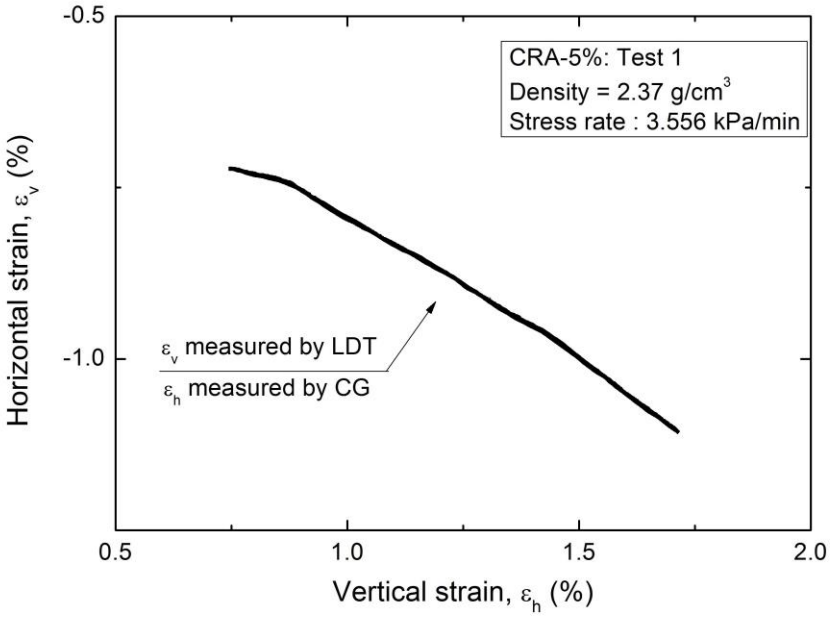
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์การผสม 3 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



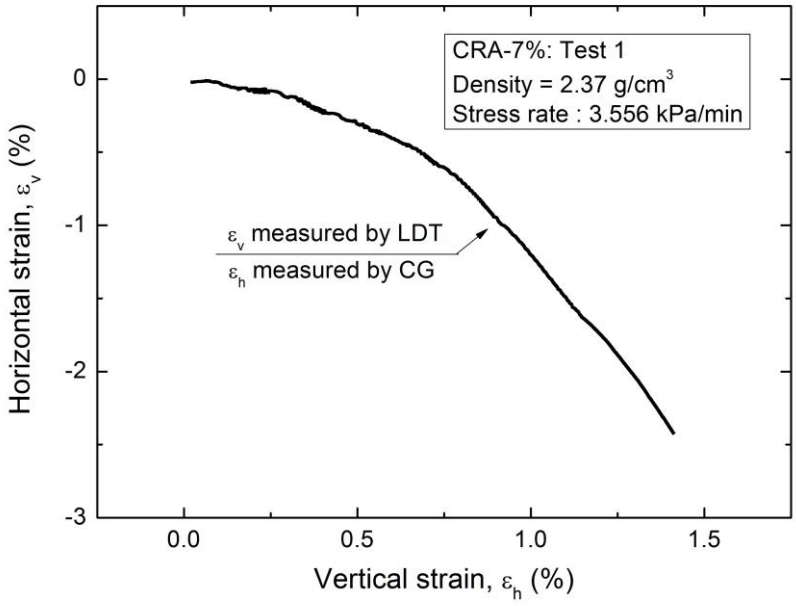
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



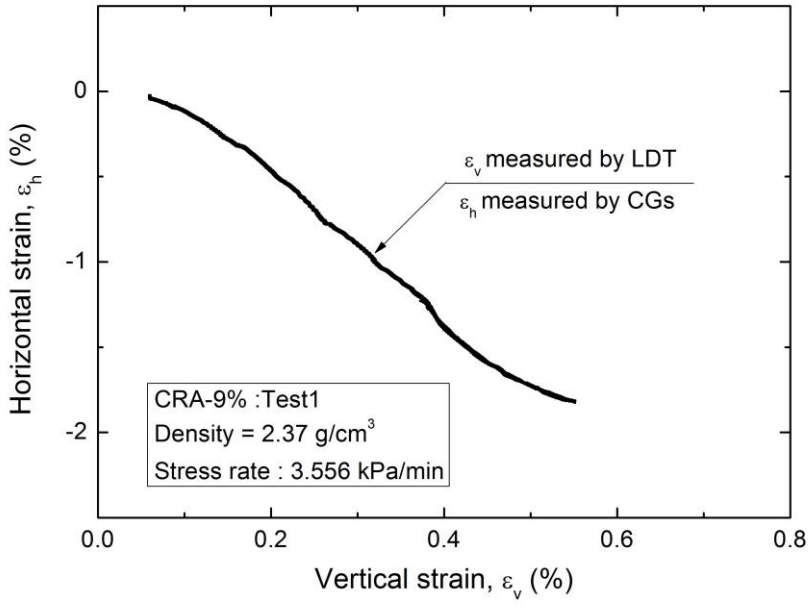
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 5 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 7 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

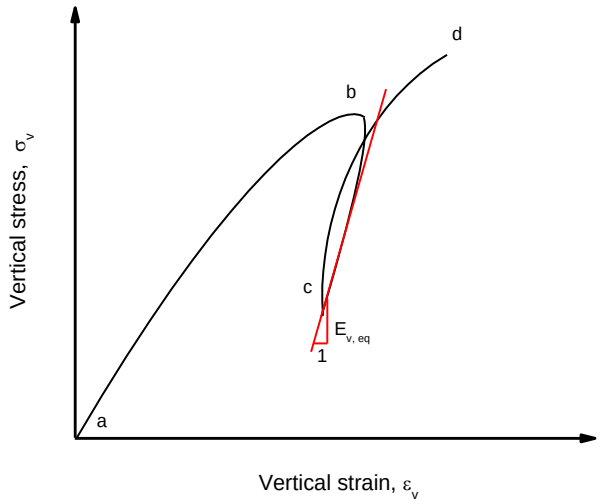


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดแนวนอนและแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่เปอร์เซ็นต์การผสม 9 % ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

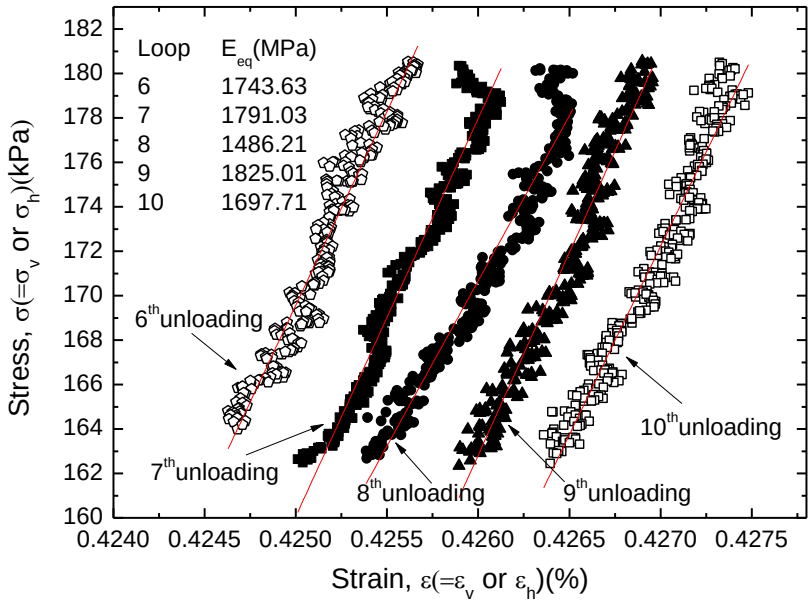
4.4.2 ค่าโมดูลัสสมมูลย์ (Equivalent modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

ค่าโมดูลัสสมมูลย์ (Equivalent modulus) (Kongkitkul et al., 2014) คือ ค่า Young's modulus ที่ได้มาจากพฤติกรรมแบบอีลาสติกสมมูลย์ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้นและความเครียดของช่วงที่ทำการถอดน้ำหนักในช่วงของการให้แรงกระทำแบบ CL ดังแสดงในรูปที่ 4.20 สำหรับตัวอย่างที่มีการบดอัดในแนวตั้งซึ่งจะได้ค่า $E_{v,eq}$ การศึกษาครั้งนี้ได้นำมาจากการศึกษาของ (Kongkitkul et al.,2014) และยังไม่ได้คำนึงถึงอุณหภูมิการผสมที่ที่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสและอัตราส่วนปัวซอง ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้ในการหาค่าโมดูลัสสมมูลย์แสดงดังรูปที่ 4.21 รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้นิยามค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ที่ได้จากช่วงถอดแรงกระทำรอบที่ 6-10 ของการให้แรงกระทำแบบ CL

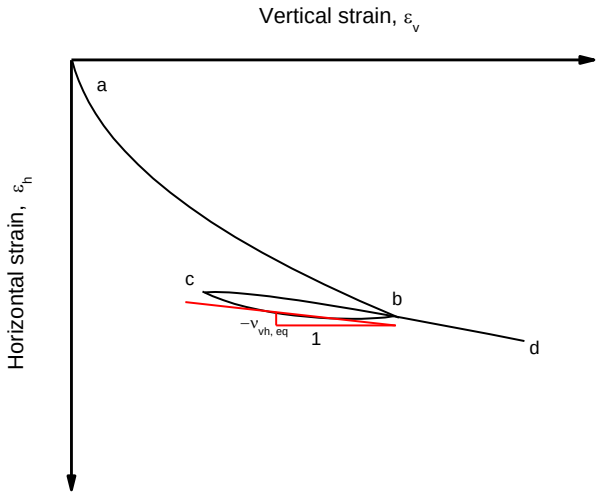
สำหรับค่าอัตราส่วนปัวซองสำหรับตัวอย่างที่มีการบดอัดในแนวตั้ง (ν_{vh}) จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวนอนและแนวตั้ง (รูปที่ 4.22) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นขณะช่วงที่ทำการถอดน้ำหนักในช่วงของการให้แรงกระทำแบบ CL ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.23



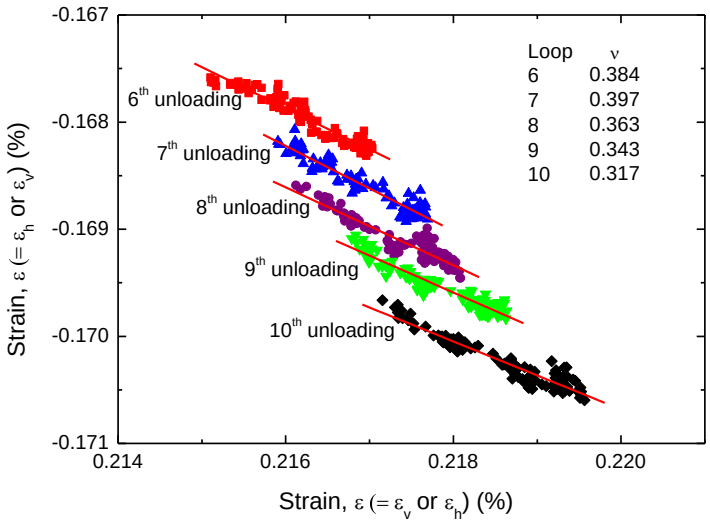
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้นิยามค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้นิยามค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ ที่ได้จากช่วงถอดแรงกระทำรอบที่ 6-10 ของการให้แรงกระทำแบบ CL



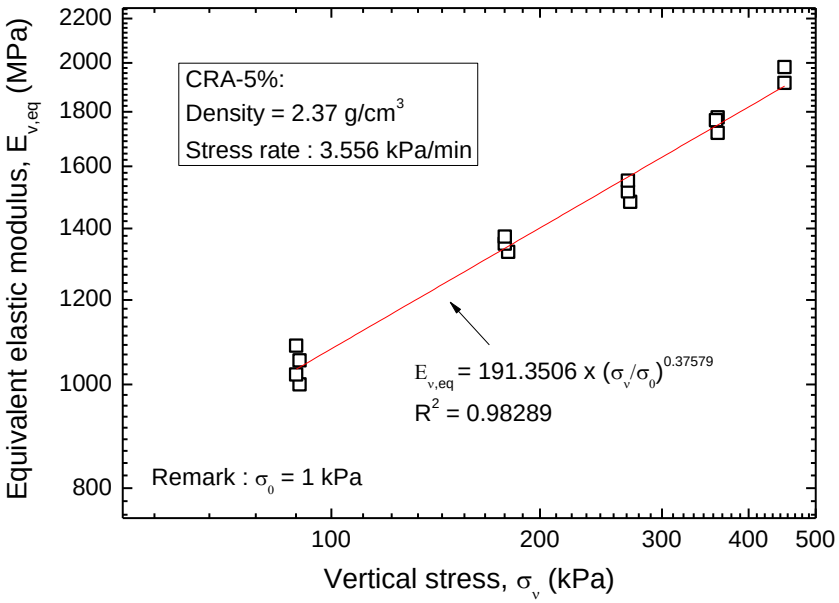
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวตั้งและแนวนอนที่ใช้นิยามอัตราส่วนปัวซอง



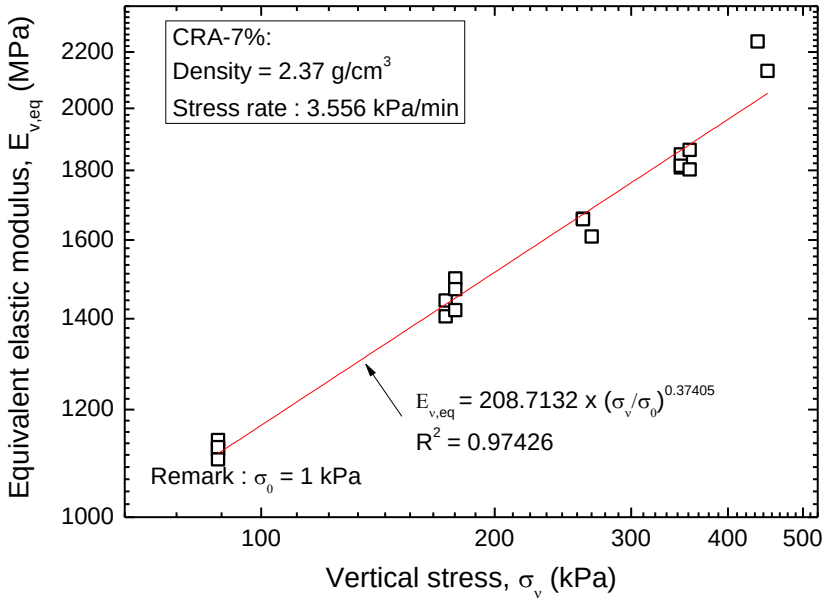
รูปที่ 4.23 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในแนวนอนและแนวตั้งที่ใช้นิยามอัตราส่วนปัวซองที่ได้จากช่วงถอดแรงกระทำรอบที่ 6-10 ของการให้แรงกระทำแบบ CL

4.4.2.1 ค่าโมดูลัสสมมูลย์ (Equivalent modulus) และอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ (Poisson's ratio) ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์

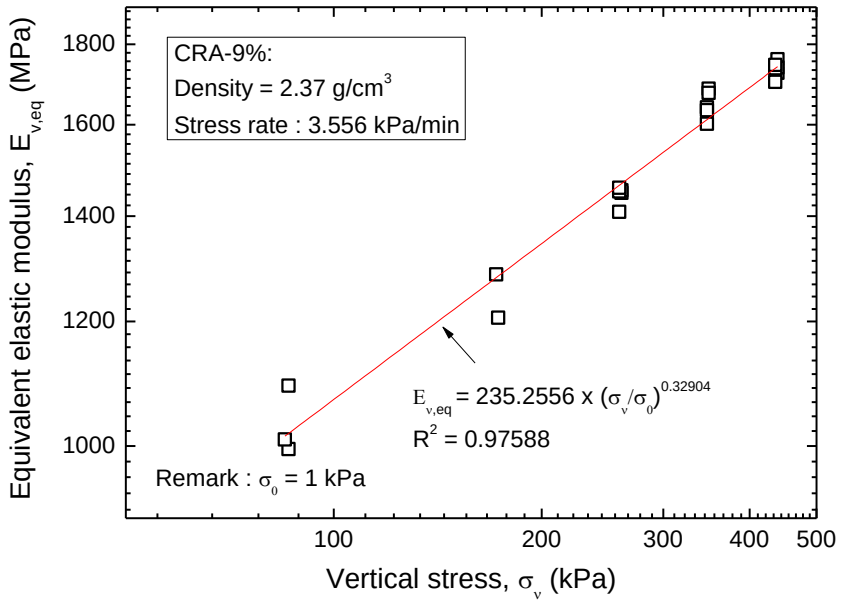
สำหรับตัวอย่างที่มีการบดอัดในแนวตั้งจะได้ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์เทียบกับแสดงดังรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.31 ที่ความหนาแน่นแตกต่างกันคือ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสามารถดูผลการทดสอบทั้งหมดได้ในภาคผนวก ก



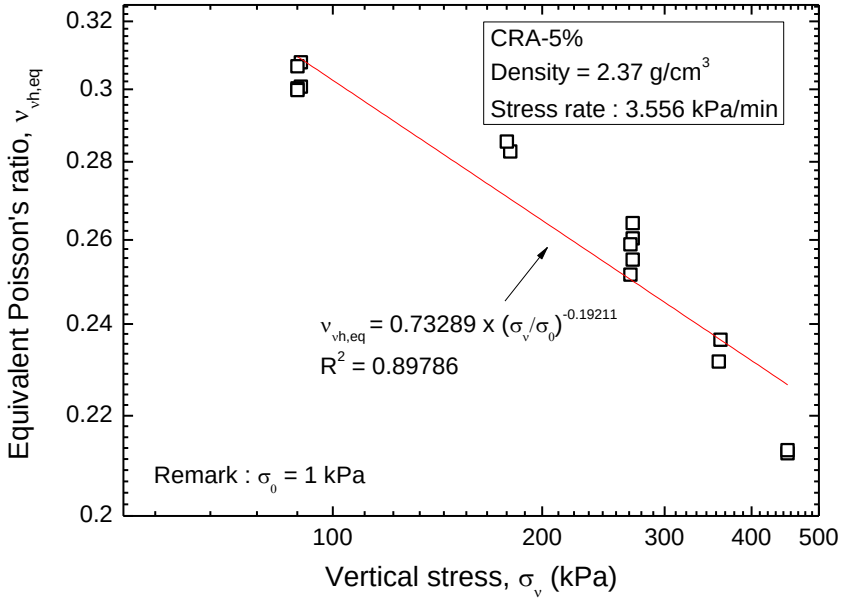
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



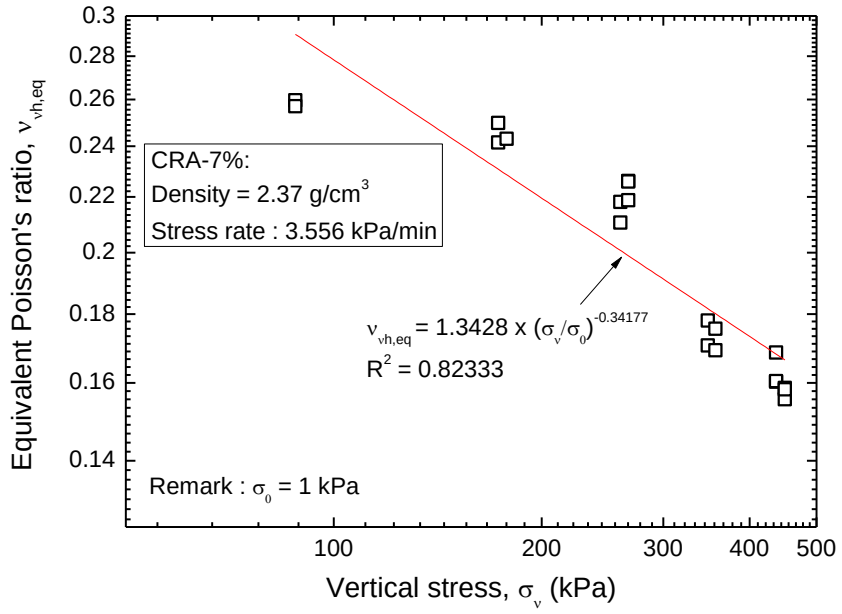
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



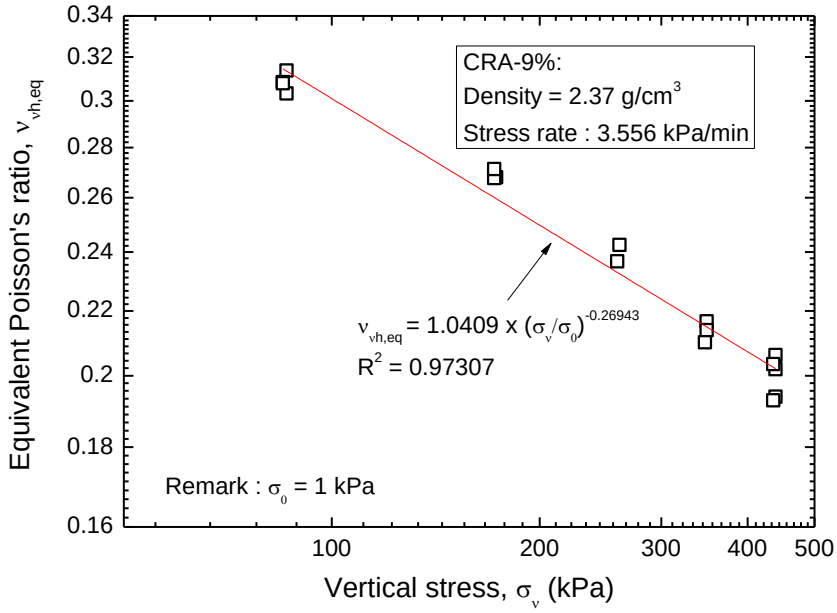
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 9 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



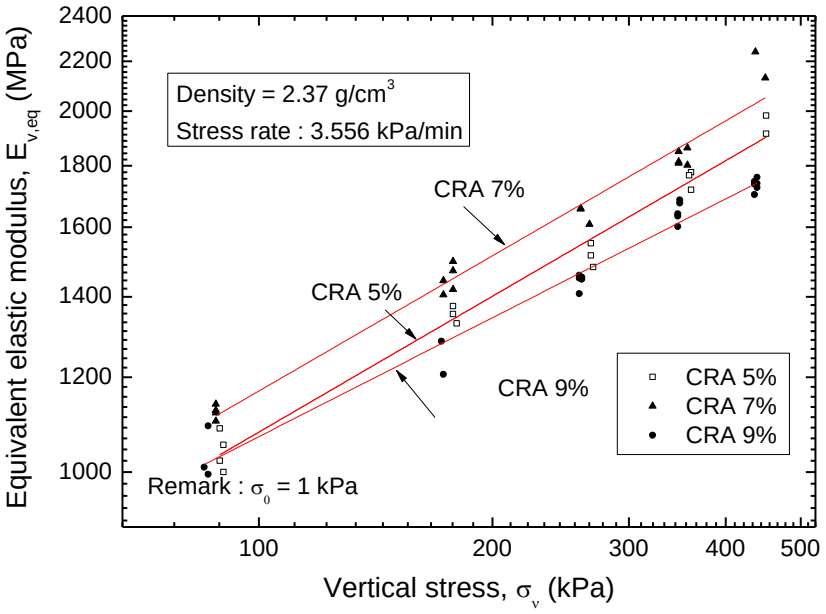
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนป๋วซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนป๋วซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

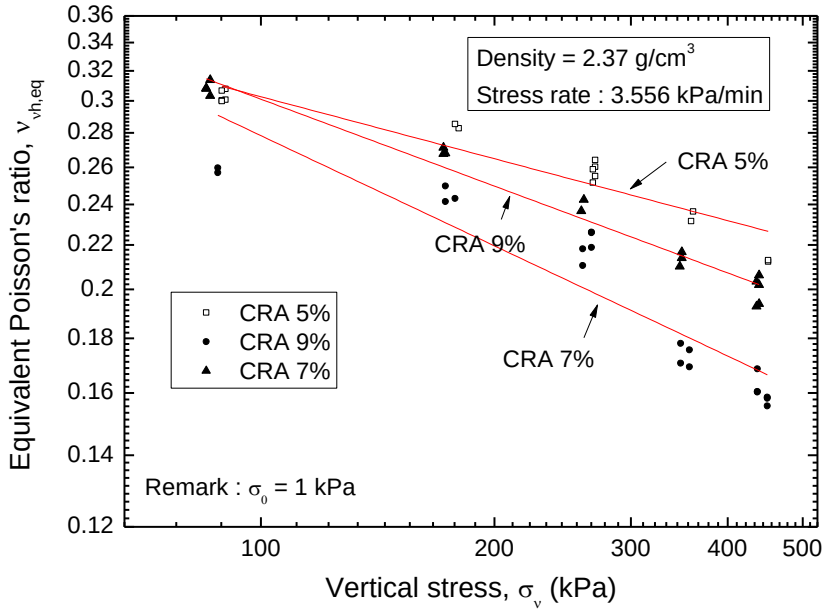


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 9 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.30 สามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 7 % มีค่ามากที่สุดรองลงมาคือ 5 % และ 9 % ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการรับแรงอัดคือตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ก็จะสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

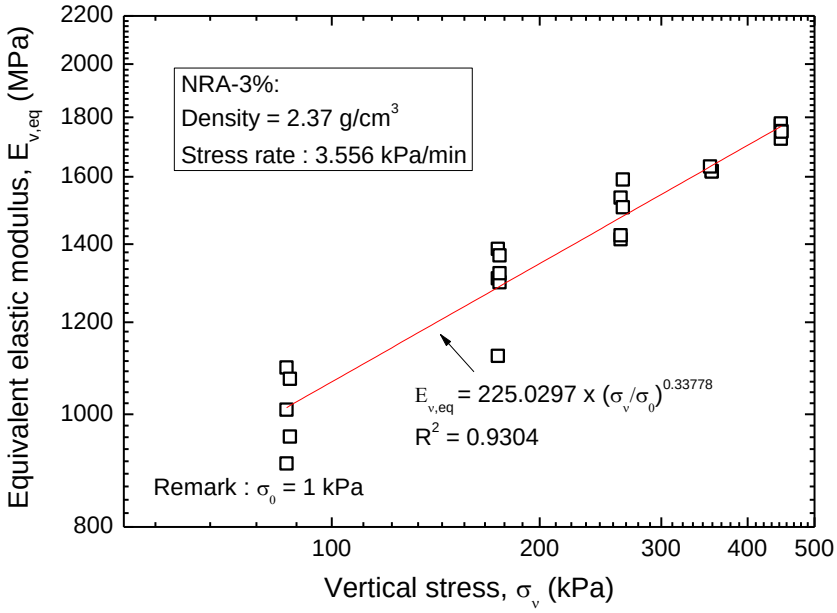
จากรูปที่ 4.31 สามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ 5 % มีค่าน้อยที่สุดรองลงมาคือ 7 % และ 9 % ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการรับแรงอัดคือตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ก็จะลดลงด้วย

จากการทดสอบแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

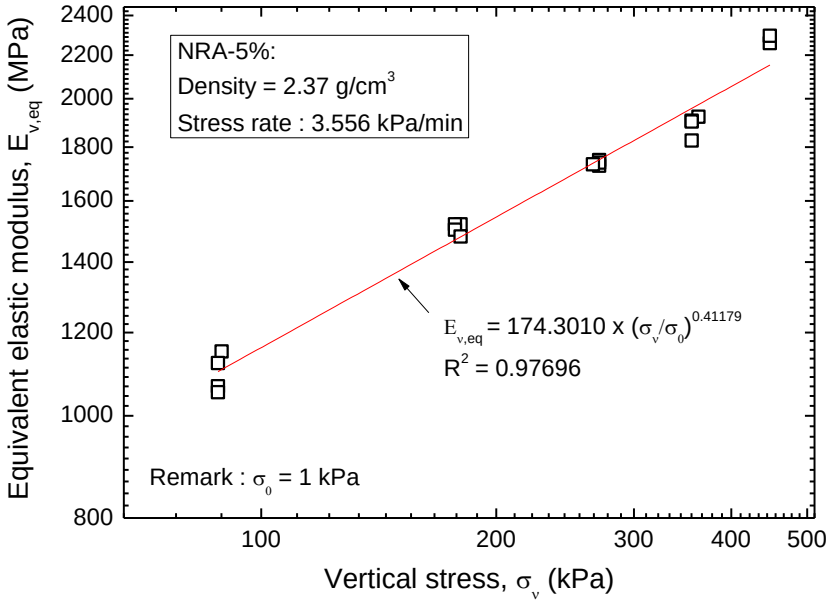
- ค่าโมดูค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ที่ได้จากการทดสอบการให้แรงกระทำซ้ำเป็นรอบจากการวิจัยในครั้งนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้น กล่าวคือ เมื่อมีการเพิ่มความเค้นในแนวตั้งค่าก็ค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์จะเพิ่มด้วยเช่นกัน
- ค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์จากการทดสอบการให้แรงกระทำซ้ำจะมีค่าลดลงตามความเค้นในแนวตั้งกล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มความเค้นในแนวตั้งค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ก็จะลดลงเช่นกัน
- ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมที่ดีที่สุดของแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์คือ 7 %

4.4.2.2 ค่าโมดูลัสสมมูลย์ (Equivalent modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพารา

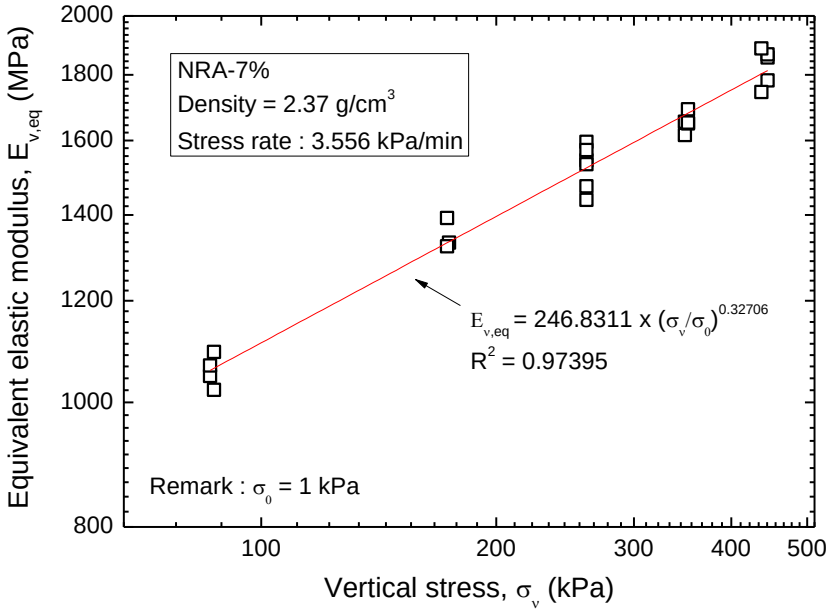
ความสัมพันธ์ค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ดังรูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.39 ที่ความหนาแน่นแตกต่างกันคือ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสามารถดูผลการทดสอบทั้งหมดได้ในภาคผนวก ก



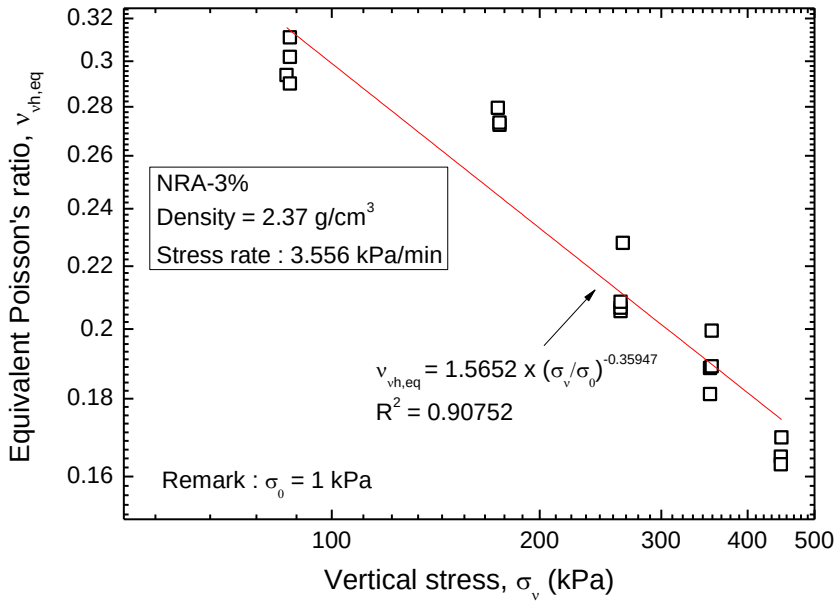
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 3 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



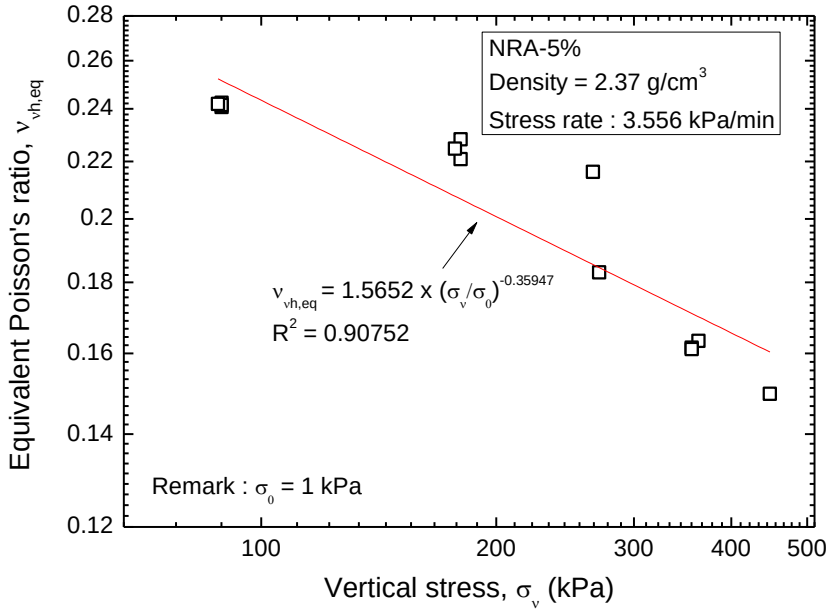
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



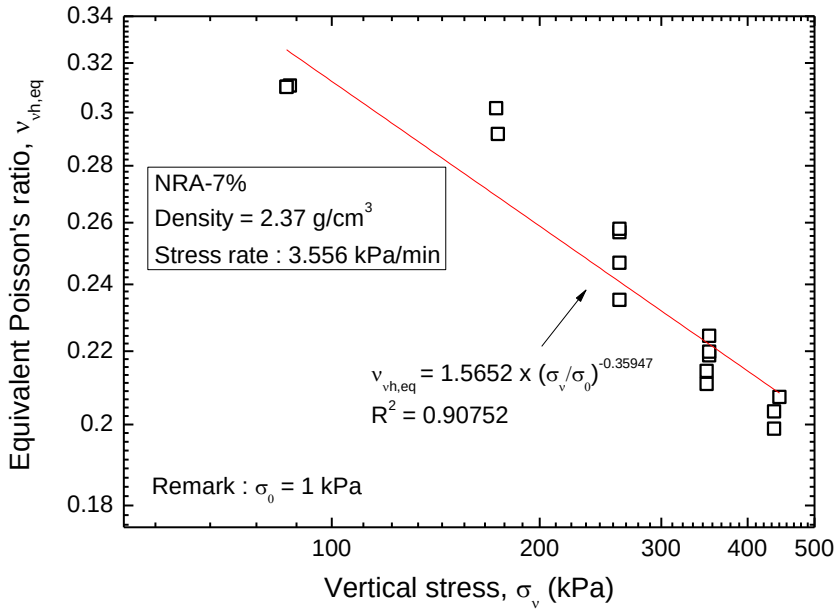
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



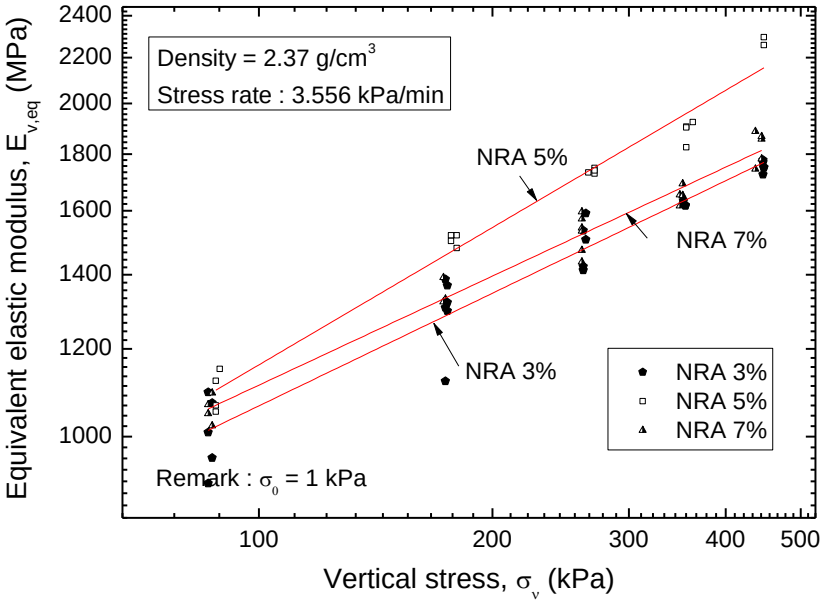
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 3 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 5 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

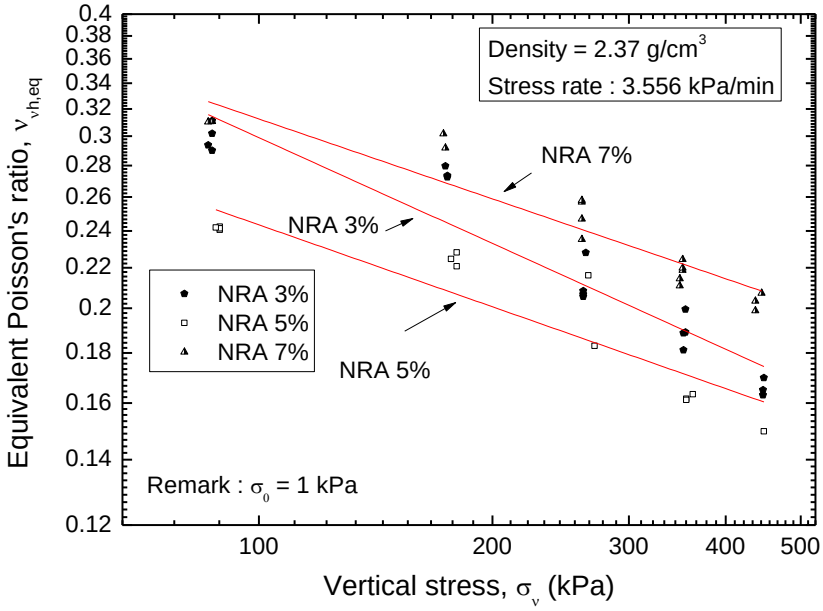


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 7 % ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.38 สามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ของแอสฟัลต์ผสมเศษยางพาราที่ 5 % มีค่ามากที่สุดรองลงมาคือ 7 % และ 3 % ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการรับแรงอัดคือตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ก็จะสูงขึ้นด้วย



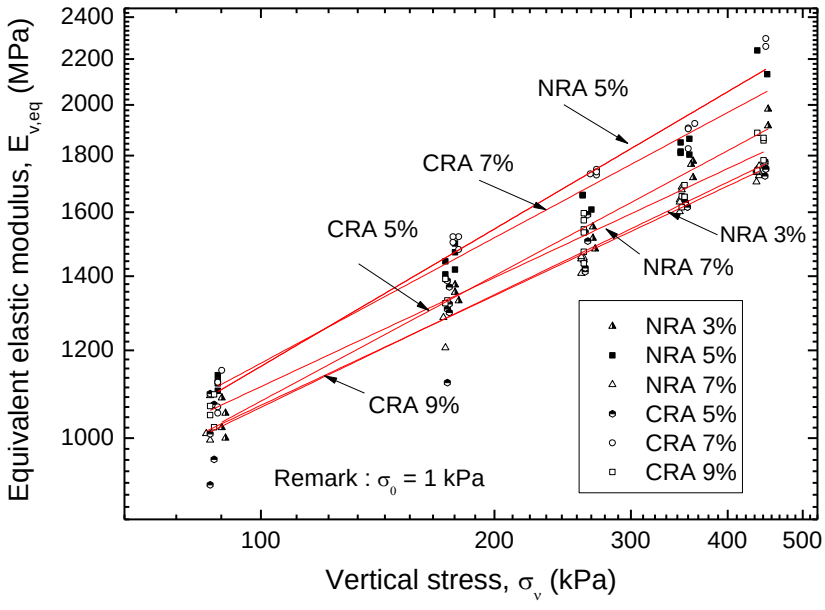
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ และความเค้นแนวตั้งของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ทำการบดอัดในแนวตั้งและมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.39 สามารถสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ 5 % มีค่าน้อยที่สุดรองลงมาคือ 3 % และ 7 % ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการรับแรงอัดคือตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ก็จะลดลงด้วย

จากการทดสอบแอสฟัลต์ผสมยางพาราสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

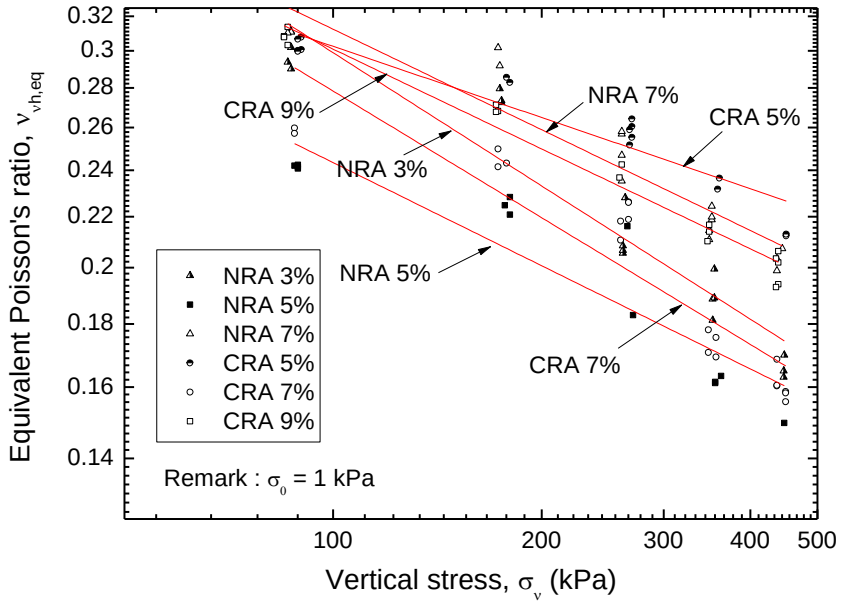
- ค่าโมดูค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ของแอสฟัลต์ผสมยางพาราที่ได้จากการทดสอบการให้แรงกระทำซ้ำเป็นรอบจากการวิจัยในครั้งนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเค้นกล่าวคือค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์จะแปรผันตรงกับความเค้นในการทดสอบ
- ค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์จากการทดสอบการให้แรงกระทำซ้ำจะมีค่าลดลงตามความเค้นในแนวตั้งกล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มความเค้นในแนวตั้งค่าอัตราส่วนปัวซองสมมูลย์ก็จะลดลงเช่นกัน
- ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนผสมที่ดีที่สุดของแอสฟัลต์ผสมยางพาราคือ 5 %

4.4.2.3 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสมมูลย์ (Equivalent modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพาราและแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสมยางพาราและแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ของ NRA 5 % มีค่าที่มากที่สุดรองลงมาคือ CRA 7 %, CRA 5 % ,NRA 7 %, NRA 3 % และ CRA 9 % ตามลำดับแต่ค่า CRA 5 % และ NRA 7 % มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากช่วงแรกค่า NRA 7 % จะมีค่ามากกว่าแต่ช่วงหลัง CRA 5 % จะมีค่ามากกว่าแทนและค่า NRA 3 % และ NRA 9 % มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากทั้งช่วง ส่วนค่าโมดูลัสสมมูลย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกับค่าอัตราส่วนป๋วซองจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มของค่าความเค้นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนป๋วซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสมยางพาราและแอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

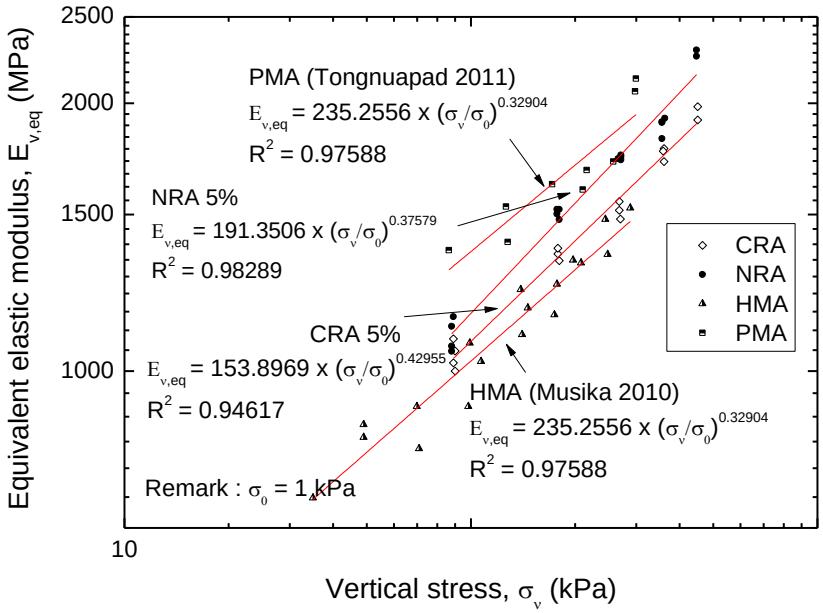
จากรูปที่ 4.41 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนป๋วซองสมมูลย์ของ NRA 5 %, CRA 7 %, NRA 3 %, CRA 9 %, NRA 7 % และ CRA 5 % ตามลำดับแต่ค่า CRA 5 % ช่วงแรกจะมีค่าที่น้อยแต่ช่วงหลังจะมีค่าที่มากกว่า

จากการทดสอบที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

- ค่าโมดูลัสสมมูลย์สำหรับทุกตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเค้นทั้งในแนวตั้งเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างกับค่าอัตราส่วนป๋วซองสำหรับตัวอย่างที่มีการบดอัดในแนวตั้งจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มของค่าความเค้นทั้งในแนวตั้ง
- ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีพฤติกรรมอีลาสติกในช่วงเริ่มต้น (ช่วงที่ความเครียดมีค่าน้อย) สำหรับทุกความหนาแน่นที่ทดสอบ

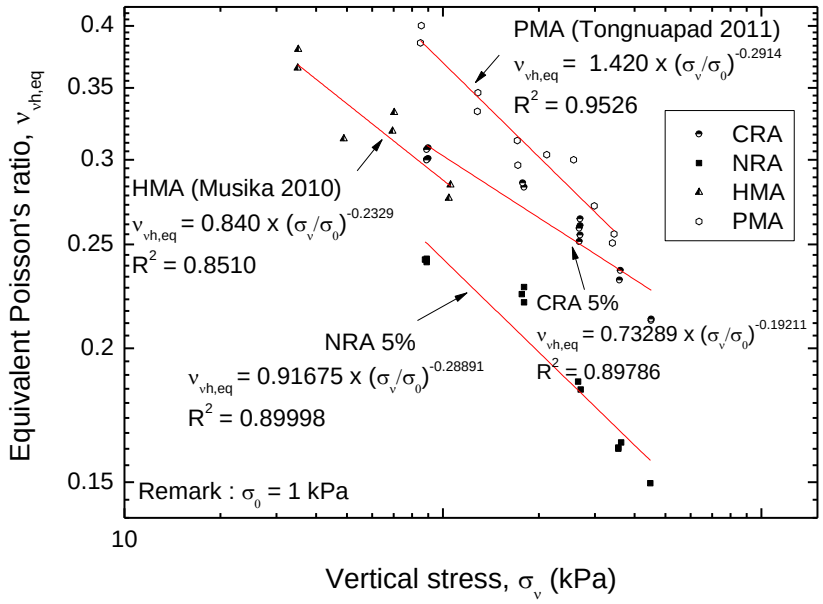
- ค่าเปอร์เซ็นต์การผสมที่มีค่าดีที่สุดสำหรับ NRA คือ NRA ที่ 5% ซึ่งเท่ากับเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมของสถาบันวิจัยยางที่ได้ศึกษาไว้
- ค่าเปอร์เซ็นต์การผสมที่มีค่าดีที่สุดสำหรับ CRA คือ CRA ที่ 7% ซึ่งใกล้เคียงกับของ Kok และ Colak (2011) ที่ได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมที่ 8 % ซึ่งอาจจะแตกต่างกันที่ตัวเศษผงยางรถยนต์และเกรดของแอสฟัลต์
- ค่าของแอสฟัลต์ผสมยางพารามีค่าที่ดีกว่าแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์เพราะอาจจะเกิดจากการที่ยางพาราเมื่อเข้าไปผสมกับแอสฟัลต์จะเกาะกับกับอนุภาคแอสฟัลต์เป็นโครงสร้างรังผึ้ง (Koichi, 2000) ทำให้เกิดความแข็งแรงมากขึ้นส่วนแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์เมื่อเศษยางรถยนต์ไปผสมกับแอสฟัลต์เศษยางรถยนต์จะเกิดการบวมตัวขึ้นและจับตัวกับอนุภาคแอสฟัลต์ (Xiang et al., 2009) เป็นกลุ่มๆขนาดใหญ่และสอดคล้องกับการบวมตัวของแอสฟัลต์ (Francis และ Laurent, 1998) ที่ปรากฏว่าแอสฟัลต์ผสมยางพารามีค่าบวมตัวของอนุภาคที่มากกว่าแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์จึงน่าจะทำให้แอสฟัลต์ผสมเศษผงยางรถยนต์มีค่าที่มากกว่าหรือเกิดจากที่แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์มีความแข็งแต่เปราะสังเกตได้จากการทดสอบ Ductility ที่มีค่าที่น้อยมากแสดงถึงความแข็งของตัวยางแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ ซึ่งทั้งแอสฟัลต์ผสมยางพาราและแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์มีค่าที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีแค่อนุภาคแอสฟัลต์ (Tuntiworawit et al., 2005) ซึ่งเมื่อใส่สารผสมเพิ่มลงไปสารผสมเพิ่มแต่ละชนิดก็จะจับตัวกับอนุภาคแอสฟัลต์และทำให้เกิดโครงสร้างที่แตกต่างกันไปและโครงสร้างเหล่านี้อาจจะไปเพิ่มกำลังให้แก่แอสฟัลต์คอนกรีต

4.4.2.4 ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสสมมูลย์ (Equivalent modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพารา แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ แอสฟัลต์คอนกรีตและโมลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสมยางพารา แอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ แอสฟัลต์คอนกรีตและโมลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.42 สามารถสรุปได้ว่าค่าโมดูลัสอีลาสติกสมมูลย์ของ PMA และ NRA 5 % มีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่ในช่วงแรก NRA 5 % จะค่าที่น้อยกว่าแต่ก็เริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่ามากกว่าและ CRA 5 % มีค่ารองลงมาส่วน HMA จะมีค่าน้อยที่สุด

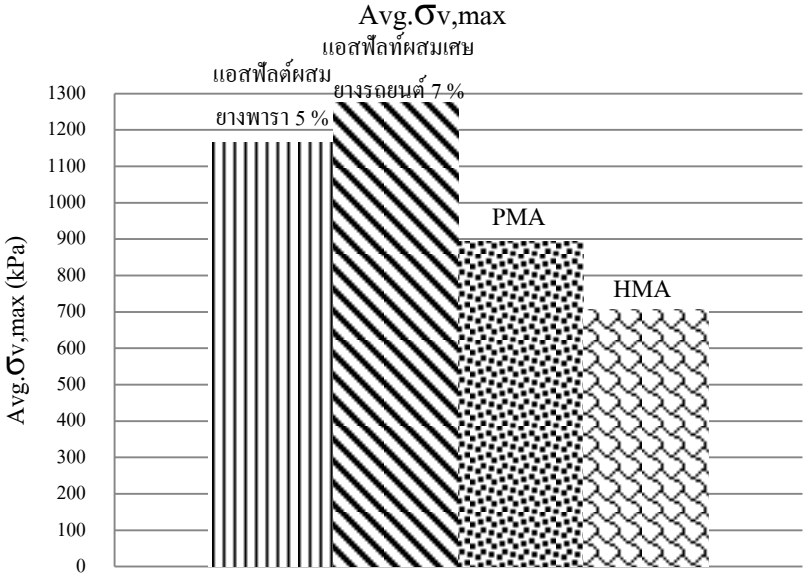


รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนป๊วซองสมมูลย์และความเค้นแนวตั้งสำหรับแอสฟัลต์ผสมยางพารา แอสฟัลต์ผสมยางรถยนต์ แอสฟัลต์คอนกรีตและโมลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.43 สามารถสรุปได้ว่าค่า NRA 5 % มีค่าอัตราส่วนป๊วซองสมมูลย์ที่น้อยที่สุดรองลงมาคือ CRA 5 % ส่วน PMA จะมีค่ามากที่สุด

4.5 ผลการเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีต (HMA) และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต (PMA) ที่เปอร์เซ็นต์การผสมเดียวกัน

4.5.1 ผลการเปรียบเทียบความเค้นสูงสุด

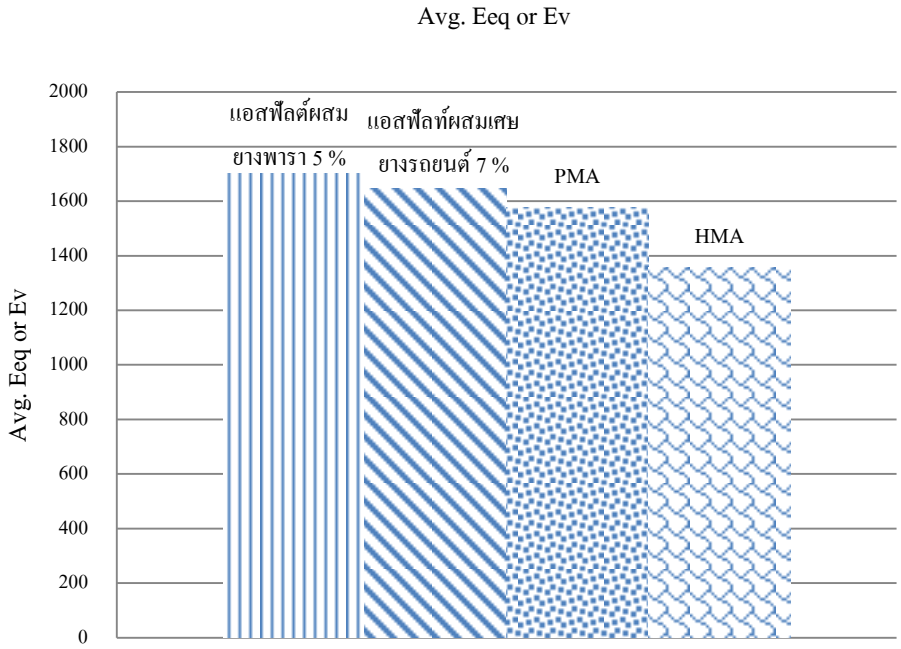


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

จากรูปที่ 4.44 สามารถสรุปได้ว่าแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 7 % มีค่ากำลังของวัสดุมากที่สุด แอสฟัลต์ผสมยางพารา 5 %, PMA ตามลำดับทั้ง CRA 7 % และ NRA 5 % จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างกันไม่มากส่วน HMA มีค่าที่น้อยที่สุดและแตกต่างกันพอสมควร

4.5.2 ผลการเปรียบเทียบการให้แรงกระทำซ้ำ

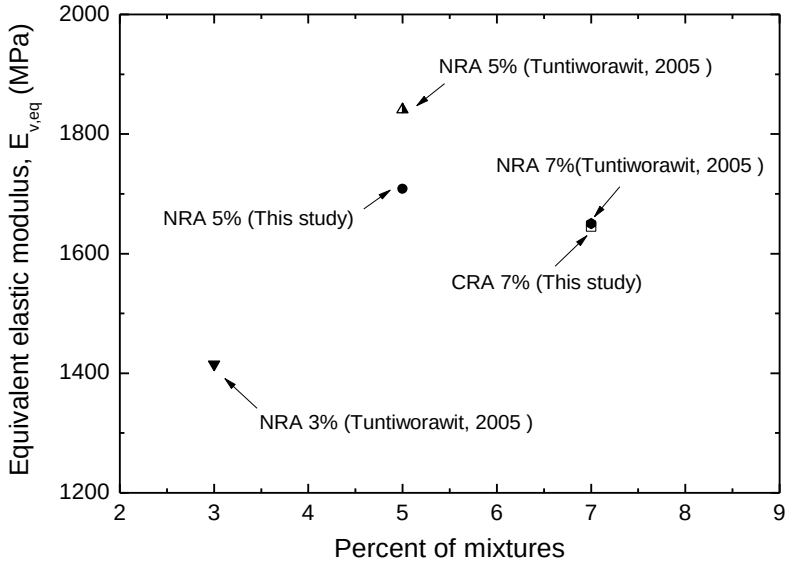
4.5.2.1 ผลการเปรียบเทียบค่าอีลาสติกสมมูลย์ (E_{eq},E_v)



รูปที่ 4.45 ค่า E_{eq}หรือ E_v ที่เปรียบเทียบกัน

จากรูปที่ 4.45 สามารถสรุปได้คือ ได้ค่า E_{eq} หรือ E_v ของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 5 % มีค่ามากที่สุด PMA, แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 5 %, และ HMA ตามลำดับ

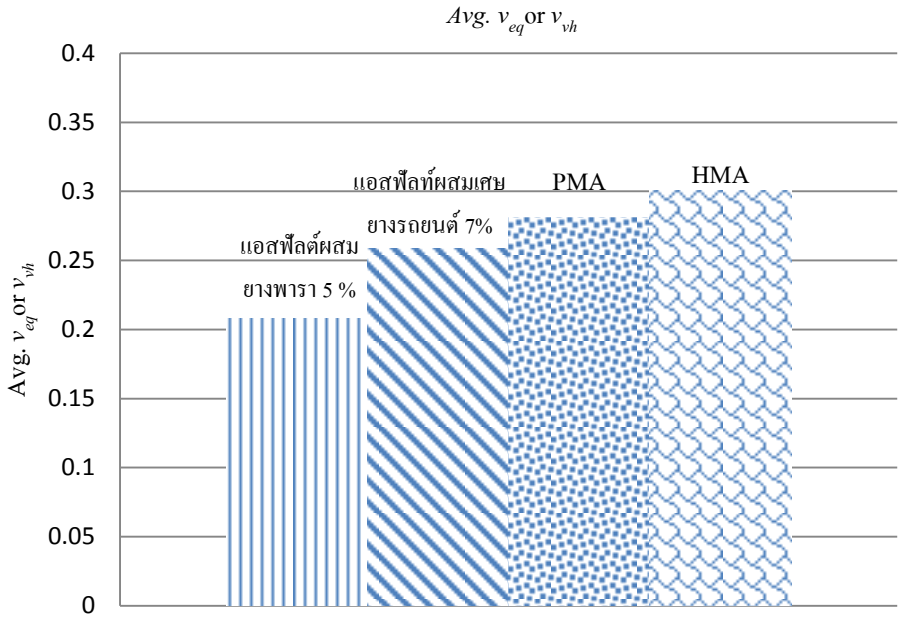
ผลการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบกับค่า Resilient Modulus ของ (Tuntiworawit et al., 2005) แสดงในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ค่า E_{eq}ที่เปรียบเทียบกับค่า Resilient Modulus

จากรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่าค่า NRA 5% ของการทดสอบครั้งนี้มีค่าน้อยกว่าค่า NRA 5 % ของ (Tuntiworawit et al., 2005) เล็กน้อยอาจเกิดจากที่ของ (Tuntiworawit et al., 2005) ให้แรงที่กระทำ 15 % ของ IDT และการให้ Rate ที่ไม่เท่ากันโดยแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาทีและช่วงเวลาพัก 0.9 วินาทีและจะหยุดการทดสอบการกดรอบที่ 150 และค่าโมดูลัสจะได้จากค่าเฉลี่ยของ 5 ค่าสุดท้าย

4.5.2.2 ผลการเปรียบเทียบค่าปัวซอง (V_{eq}, V_{vh})



รูปที่ 4.47 ค่า v_{eq} หรือ v_{vh} ที่เปรียบเทียบกัน

จากรูปที่ 4.47 สามารถสรุปได้คือ v_{eq} หรือ v_{vh} ได้ค่า ของแอสฟัลต์ผสมยางพารา 5 % มีค่ามากที่สุด แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ 5 %, PMA และ HMA ตามลำดับ แอสฟัลต์ประเภทที่มีค่า v_{vh} มาก คือ เกิดการเสียรูปด้านข้างที่มากกว่าแอสฟัลต์ประเภทอื่น

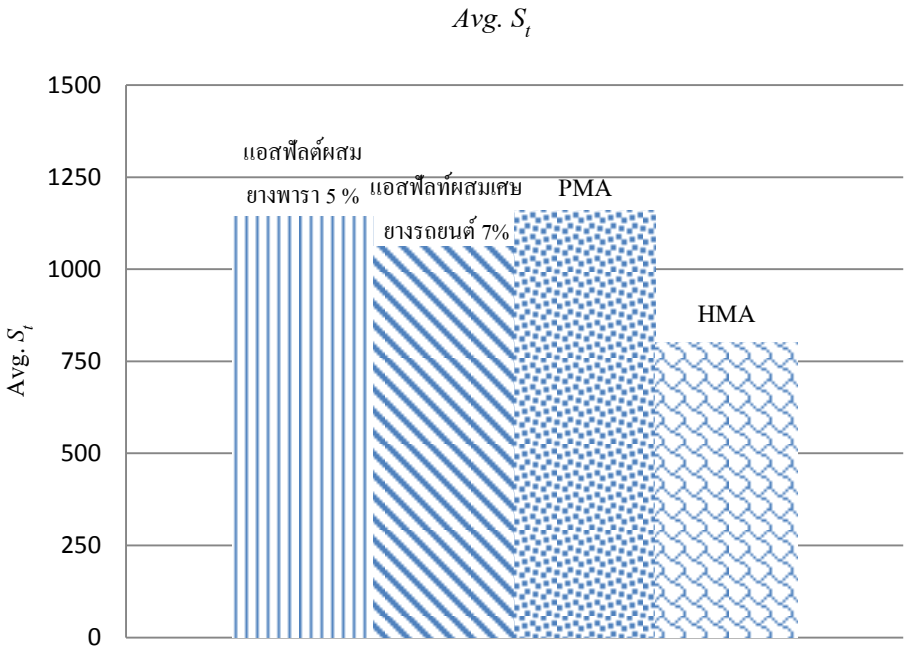
4.6 ผลการทดสอบ Indirect tensile test

ทำการทดสอบ Indirect tensile test ของแอสฟัลต์ทั้ง 4 ชนิดคือ แอสฟัลต์คอนกรีต โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพารา แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ ชนิดละ 3 ตัวอย่าง บดอัดที่ความหนาแน่น 2.37 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ Indirect tensile test

Test name	**Density (g/cm^3)**			**Indirect tensile strength, St (kPa)**		
	ρ_{target}	$\rho_{measure}$	$\rho_{avg.}$	**Load (N)**	**St**	**St$_{avg.}$**
AC 60/70 - 01	2.37	2.3	2.293	11,450	916.2012	801.7951
AC 60/70 - 02		2.29		8,123	650.6206	
AC 60/70 - 03		2.29		10,230	838.5635	
PMA - 01		2.30	2.31	14431	1160.885	1159.895
PMA - 02		2.31		14122	1134.457	
PMA - 03		2.32		14743	1184.342	
CRA 7% - 01		2.29	2.297	13787	1068.629	1062.001
CRA 7% - 02		2.297		13413	1068.829	
CRA 7% - 03		2.306		13154	1048.544	
NRA 5% - 01		2.311	2.31	14675	1139.988	1142.827
NRA 5% - 02		2.307		14614	1133.061	
NRA 5% - 03		2.313		14738	1155.432	

จากตารางที่ 4.5 สามารถสรุปได้ว่าค่า Indirect tensile strength เฉลี่ยของโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์มีค่าที่มากที่สุดรองลงมาคือ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพารา แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์และแอสฟัลต์คอนกรีตดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 ค่า Indirect tensile strength ที่เปรียบเทียบกัน

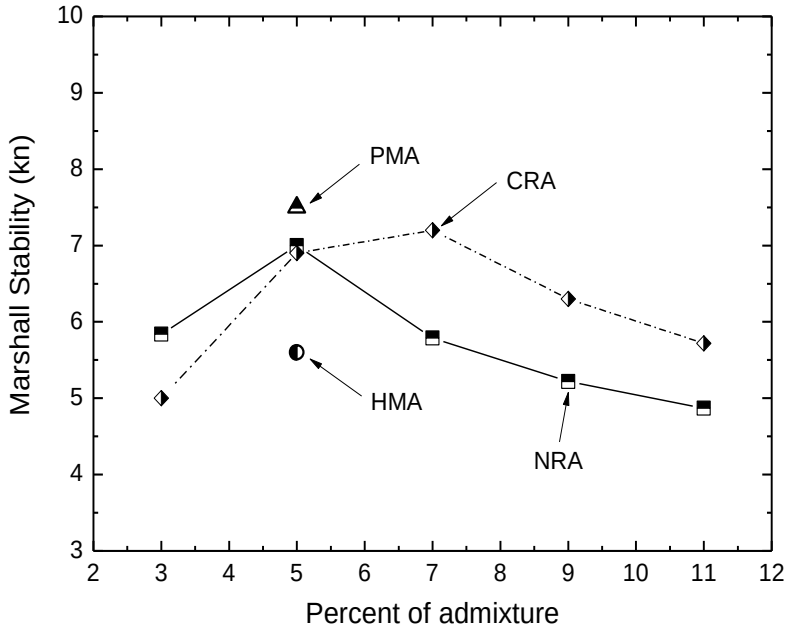
4.7 ผลการทดสอบ Marshall test

ทำการทดสอบ Marshall test ตามมาตรฐาน ทล.ท. 604/2517 ทำการบดอัดจำนวน 50 ครั้งสำหรับการจราจรชั้น light traffic และ medium traffic ทำการทดสอบแอสฟัลต์ทั้ง 4 ชนิดคือ แอสฟัลต์คอนกรีต โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพารา แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ Marshall test

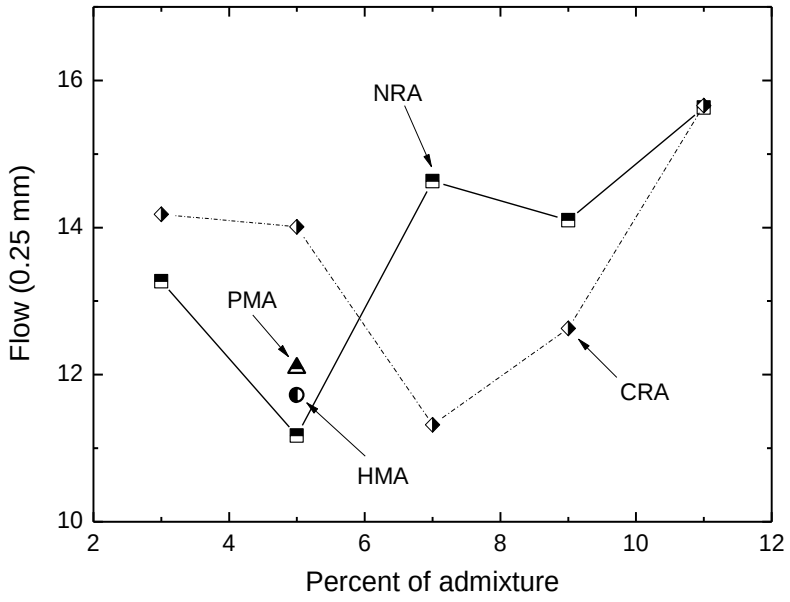
ส่วนผสม แอสฟัลต์คอนกรีต	Marshall Stability (kN)	Marshall Flow (0.25 mm)	VMA (%)	Air void (%)
HMA				
5 % of HMA	5.6	12.09	21.178	11.943
PMA				
5 % of PMA	7.5	11.72	22.367	13.270
AC 60 -70 + Natural Rubber (NRA)				
3 % of AC 60-70 + Natural Rubber	5.84	13.27	24.342	15.628
5 % of AC 60-70 + Natural Rubber	7	11.17	21.037	12.029
7 % of AC 60-70 + Natural Rubber	5.79	14.63	23.959	15.444
9 % of AC 60-70 + Natural Rubber	5.22	14.10	26.710	17.995
11 % of AC 60-70 + Natural Rubber	4.87	15.63	24.075	15.127
AC 60 -70 + Crumb Rubber (CRA)				
3 % of AC 60-70 + Crumb Rubber	5	14.18	18.98	9.532
5 % of AC 60-70 + Crumb Rubber	6.9	14.01	21.867	13.068
7 % of AC 60-70 + Crumb Rubber	7.2	11.32	22.950	14.321
9 % of AC 60-70 + Crumb Rubber	6.3	12.63	23.201	14.695
11 % of AC 60-70 + Crumb Rubber	5.72	15.66	25.085	15.264

จากตารางที่ 4.6 สามารถสรุปค่าเฉลี่ยของค่า Stability และค่า Flow ได้ดังรูปที่ 4.49 และ 4.50



รูปที่ 4.49 ผลการทดสอบค่า Marshall Stability

จากรูปที่ 4.49 สามารถสรุปได้ว่าค่า Stability ของโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์มีค่าที่มากที่สุด รองลงมาคือแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ที่ 7 % และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพาราที่ 5 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบค่า Marshall Flow

จากรูปที่ 4.50 สามารถสรุปได้ว่าค่า Flow ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมยางพาราที่ 5 % มีค่าน้อยที่สุด เพิ่มขึ้นมาคือแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเศษยางรถยนต์ที่ 7 % และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ ตามลำดับ

4.8 การเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์

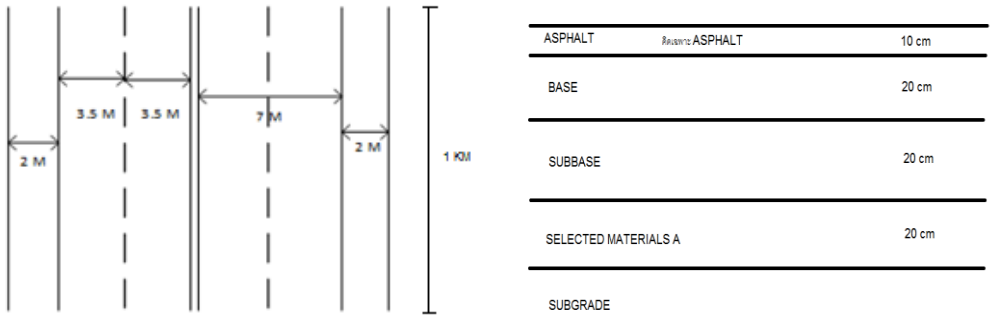
4.8.1 การเปรียบเทียบด้านราคาการก่อสร้าง

การเปรียบเทียบครั้งนี้จะเปรียบเทียบระหว่างถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์ AC 60/70 ถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) ถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพาราและถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ โดยใช้อัตราการผสมแอสฟัลต์ต่อมวลรวมที่ 5 % โดยคิดความยาวถนน 1 กิโลเมตร กำหนดราคาแอสฟัลต์คอนกรีต 60/70 เท่ากับ 35530 บาทต่อตัน(อ้างอิง: บริษัท ทิปโก้แอสฟัลต์ จำกัด ราคาประจำเดือน กันยายน 2556) ราคา PMA ราคาตันละ 43,735 บาท (อ้างอิง: บริษัท ทิปโก้แอสฟัลต์ จำกัด ราคาประจำเดือน กันยายน 2556) ราคาน้ำยางพารากิโลกรัมละ 68 บาท (อ้างอิง: ราคาประมูล ตลาดกลางยางพาราสุราษฎร์ธานี วันที่ 28 มีนาคม 2557) ราคาเศษผงยางรถยนต์กิโลกรัมละ 22 บาท (อ้างอิง: บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด ราคาประจำเดือน มีนาคม 2557) ราคาวัสดุตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ราคาวัสดุต่อตัน

ประเภทวัสดุ	ราคาค่าวัสดุต่อตัน (บาท)
แอสฟัลต์ 60/70	35,530
PMA	43,735
ยางพารา	68,000
เศษยางรถยนต์	22,000

และลักษณะของถนนที่ทำการเปรียบเทียบเป็นถนน 4 เลน ความกว้าง 18 เมตรยาว 1 กิโลเมตรและคิดเฉพาะชั้นแอสฟัลต์ดังรูปที่ 4.51



(ก) **(ข)**

รูปที่ 4.51 (ก) Top View (ข) หน้าตัดถนนที่ทำการเปรียบเทียบ

ซึ่งการเปรียบเทียบทางด้านราคาในการศึกษาครั้งนี้จะทำการประเมินราคาแอสฟัลต์เฉพาะการแทนที่ของแอสฟัลต์โดยใช้สารผสมเพิ่มแทนที่ลงไปในแอสฟัลต์ AC 60/70 ตามเปอร์เซ็นต์ไม่ได้คิดถึงราคาที่อยู่ขั้นตอนในการผสมและการเปรียบเทียบทางด้านปริมาตรผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.8

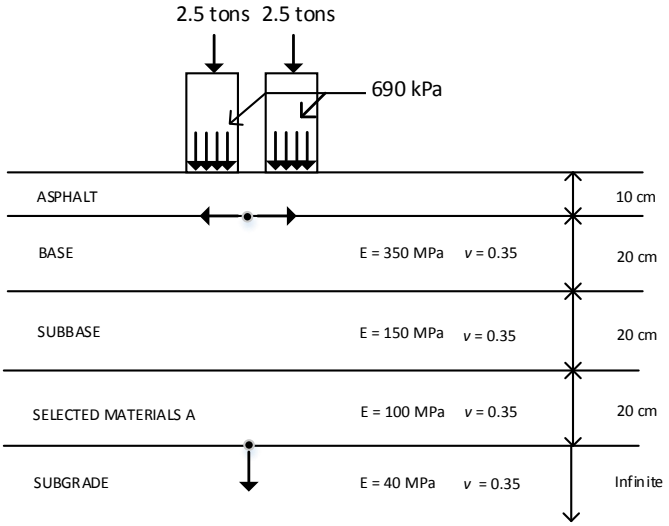
ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบด้านราคา

ประเภทถนน	**ราคาค่าก่อสร้างแอสฟัลต์ต่อกิโลเมตร (บาท)**
ถนนที่ใช้ส่วนผสมเป็น AC60/70	3,197,700
ถนนที่ใช้ส่วนผสมเป็น PMA	3,936,150
ถนนที่ใช้ส่วนผสมเป็นยางพารา 5%	3,343,815
ถนนที่ใช้ส่วนผสมเป็นยางรถยนต์ 5%	3,127,815

จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ดังนี้คือราคาของถนนที่ใช้ PMA มีค่าก่อสร้างที่แพงที่สุดรองลงมาคือยางพารา, AC60/70 และเศษยางรถยนต์

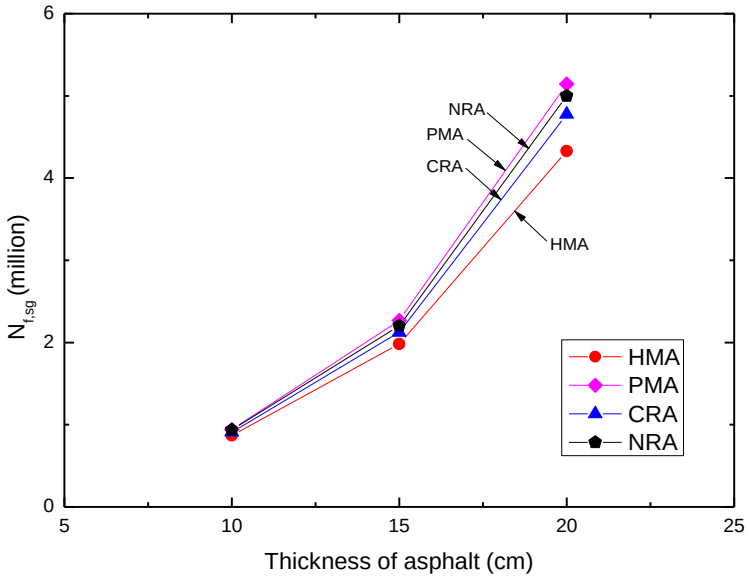
4.8.2 การเปรียบเทียบด้านความทนทาน

การเปรียบเทียบครั้งนี้จะเปรียบเทียบระหว่างถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์ AC 60/70 ถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) ถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมยางพาราและถนนที่สร้างด้วยแอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ โดยใช้อัตราการผสมแอสฟัลต์ต่อมวลรวมที่ 5 % และให้ความหนาชั้นแอสฟัลต์ 10, 15 และ 20 เซนติเมตรลักษณะถนนและน้ำหนักที่กระทำต่อถนนที่ทำการเปรียบเทียบใช้ตามแบบมาตรฐาน(กรมทางหลวงชนบท, 2556) ตารางการแนะนำการออกแบบของชั้นโครงสร้างทางอายุการใช้งาน 7 ปี ปริมาณการจราจร1001-1750 คันต่อวัน (ADT) ดังรูปที่ 4.52 ทำการเปรียบเทียบความคงทนถนนโดยใช้โปรแกรม KENPAVE คำนวณ และใช้สูตรการหาจำนวนรอบของกรมทางหลวง 2543 และ Asphalt Institute (9^{th} edition) วิธีการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ค

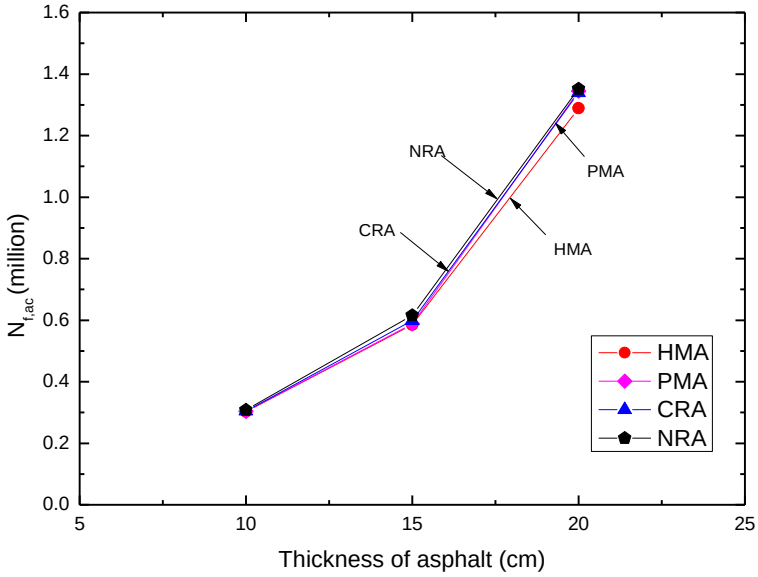


รูปที่ 4.52 ลักษณะถนนและโหลดที่กระทำต่อถนน

ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Kenpave แล้วคำนวณหา N_f โดยใช้สูตรของกรมทางหลวงดังรูปที่ 4.53 และใช้สูตรของ Asphalt Institute (9^{th} edition) โดยที่พารามิเตอร์ในการคำนวณมาจากค่าทั่วไปของวัสดุที่ใช้ในงานทาง (Taesiri และ Jitareekul, 2002) ดังรูปที่ 4.54



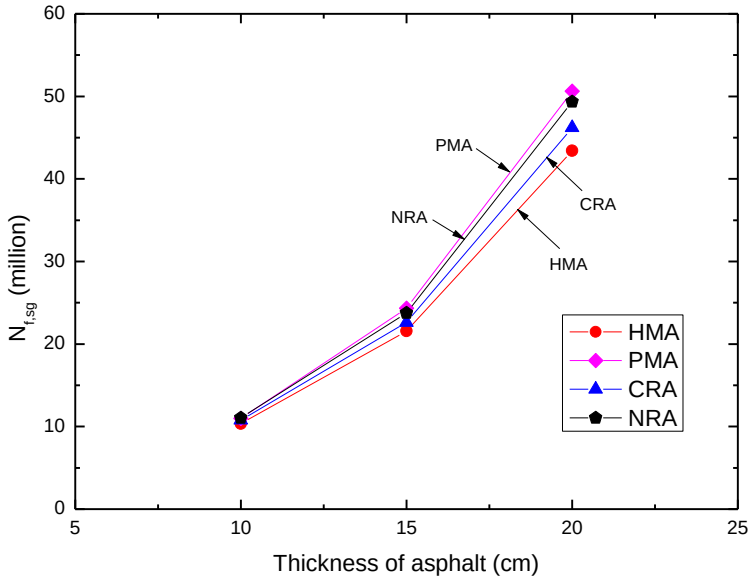
(ก)



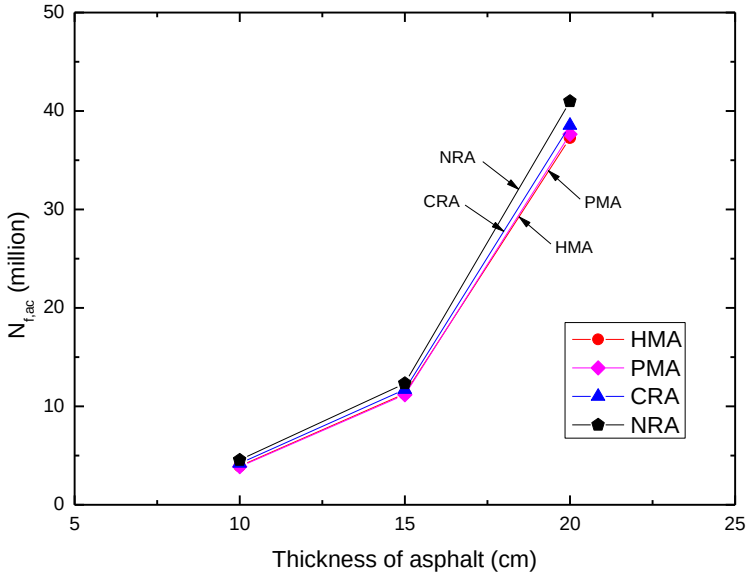
(ข)

รูปที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Kenpave โดยใช้สูตรของ Asphalt Institute (9^{th} edition) (ก) พิจารณาความเครียดที่ชั้น Subgrade (ข) พิจารณาความเครียดที่ชั้น Asphalt

จากรูปที่ 4.53 จะเห็นได้ว่าบนชั้นดินเดิม PMA สามารถรับจำนวนรอบที่มากที่สุดรองลงมาคือ แอสฟัลต์แอสฟัลต์ผสมยางพารา แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์และ HMA ส่วนใต้ชั้นแอสฟัลต์ แอสฟัลต์ผสมยางพารามีค่าจำนวนรอบที่มากที่สุดรองลงมาคือ PMA แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ และ HMA ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแอสฟัลต์ผสมยางพารามีความทนทานมากที่สุดรองลงมาคือ PMA แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ และ AC 60/70 แต่เนื่องจากไม่ได้ทดสอบความล้าของแอสฟัลต์ จึงเป็นแค่ตัวเปรียบเทียบในการศึกษาครั้งนี้หรอช่วยลด Strain ทำให้จำนวนรอบเพิ่มขึ้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.54 ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Kenpave โดยใช้สูตรของกรมทางหลวง (ก) พิจารณาความเครียดที่ชั้น Subgrade (ข) พิจารณาความเครียดที่ชั้น Asphalt

จากรูปที่ 4.54 จะเห็นได้ว่าบนชั้นดินเดิม PMA มีค่าจำนวนรอบที่มากที่สุดรองลงมาคือ แอสฟัลต์แอสฟัลต์ผสมยางพารา แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์และ HMA ส่วนใต้ชั้นแอสฟัลต์แอสฟัลต์ผสมยางพารามีค่าจำนวนรอบที่มากที่สุดรองลงมาคือ PMA แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์และ HMA โดยการพิจารณาชั้นที่มีค่าจำนวนรอบที่น้อยที่สุดนั้นคือใต้ชั้นแอสฟัลต์นั้นจึงพบว่าแอสฟัลต์ผสมยางพารามีความทนทานมากที่สุดรองลงมาคือ PMA แอสฟัลต์ผสมเศษยางรถยนต์ และ AC 60/70 แต่เนื่องจากไม่ได้ทดสอบความล้าของแอสฟัลต์จึงเป็นแค่ตัวเปรียบเทียบในการศึกษาครั้งนี้หรอช่วยลด Strain ทำให้จำนวนรอบเพิ่มขึ้น