

## เอกสารอ้างอิง

1. Sombatsompop, N., Wimolmala, E., and Sirisinha C., 2008, "Fly-ash particles and precipitated silica as fillers in rubbers: Part III. cure characteristics, and mechanical & oil resistance properties of NBR" **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 110, No. 5, pp. 2877-2883.
2. Kantala, C., Wimolmala, E., Sirisinha, C. and Sombatsompop, N., 2009, "Reinforcement of compatibilized NR/NBR blend by fly-ash particles and precipitated silica", **Polymers for Advanced Technology**, Vol. 20, No. 5, pp. 448-458.
3. พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548, สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), หน้า 75-86, 99-100.
4. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, เอกชัย วิมลมาลา และชัชวาลย์ กันทะลา, 2550, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการ "การพัฒนาพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ที่มีถั่วลอยเป็นสารเติมแต่งเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โอริง", สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) หน้า 23-63.
5. Warring, R.H., 2548, **Seals and Sealing Hand Book**, Trade and Technical Press LTD., England, pp. 1-2.
6. ยางสังเคราะห์, [online], Available: [Http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=rubberchemist&month=062008&date=10&group=4&gblog=6](http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=rubberchemist&month=062008&date=10&group=4&gblog=6) [20 มิถุนายน 2554].
7. พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2548, ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), หน้า 25-29.
8. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, 2539, เทคโนโลยียาง, ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 74, 104, 185.

9. **Structure and Mineralogical Properties**, [Online], Available: [Http://www.hoffmann-mineral.com/Neuburg-Siliceous-Earth/Neuburg-Siliceous-Earth-Unique-Raw-Material/Structure-and-Mineralogical-Properties](http://www.hoffmann-mineral.com/Neuburg-Siliceous-Earth/Neuburg-Siliceous-Earth-Unique-Raw-Material/Structure-and-Mineralogical-Properties) [2011, June 20].
10. Wang, M-J., 1998, "Effect of polymer-filler and filler-filler interactions on dynamic properties of filled vulcanizates", **Rubber Chemistry and Technology**, Vol. 71, No. 3, pp. 520-589.
11. Leblanc, J.L., 2002, "Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds" **Progress in Polymer Science**, Vol. 27, No. 4, pp. 627-687.
12. Thongsang, S. and Sombatsompop, N., 2005, "Effect of filler surface treatment on properties of fly ash/NR blends", **SPE - ANTEC, Conference Proceedings 8**, pp. 355-359.
13. ชูลีพันธ์ พันธุ์เยี่ยม, 2552, สมบัติทางกลและทนน้ำมันของยางผสมผงเขม่าดำ/ยางเอ็นบีอาร์/ยางเอชเอ็นบีอาร์ที่เติมด้วยด้วยผงซิลิกาเกรดการก้ำและผงถ่านลอย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 19-21, 107-108, 117-118.
14. Hewitt, N., 2007, **Compounding Precipitated Silica in Elastomers**, William Andrew Publishing, U.S.A., pp. 4, 517.
15. อุยารัตน์ รัตนกำนวม, สารเติมแต่งพอลิเมอร์, [Online], Available: [Http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u\\_ratanakamnuan/CH441-Polymers-Additives-BW.pdf](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/u_ratanakamnuan/CH441-Polymers-Additives-BW.pdf) [21มิถุนายน 2554].
16. อิทธิพล แจ่มชัด, 2544, **พอลิเมอร์คอมโพสิต**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, หน้า 63-67.

17. เอกชัย วิมลมาลา, กฤษรา คงนวล และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ, 2552, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการยางเซลดูดาร์จากวัสดุผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางปะเก็นและยางรองกันกระแทก: เสริมแรงโดยผงถ้ำลอย ผงซิลิกา และผงเขม่าดำ, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 15-17, 45-46, 54.
18. การแพร่และกฎการแพร่ของแกรหัม, [Online], Available:  
[Http://www.atom.rmutphysics.com/charudoldnews/0/285/22/gas1/grahamlaw.htm](http://www.atom.rmutphysics.com/charudoldnews/0/285/22/gas1/grahamlaw.htm)  
 [20 มิถุนายน 2554].
19. การเกิดพันธะเคมี, [Online], Available:  
[Http://nakhamwit.ac.th/pingpong\\_web/React\\_Rate/ra\\_clip\\_image004.jpg](http://nakhamwit.ac.th/pingpong_web/React_Rate/ra_clip_image004.jpg)  
 [20 มิถุนายน 2554].
20. พรทิพย์ ศรีโสภา, สารเคมีสำหรับยาง, [Online], Available:  
[Http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_11\\_2547\\_additives\\_rubber.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_11_2547_additives_rubber.pdf)  
 [20 มิถุนายน 2554].
21. พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528, สารเคมีสำหรับยาง, สงขลา, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หน้า 4-24.
22. Morton M., 1987, **Rubber Technology**, 3<sup>rd</sup> ed, New York, Van Nostrand Reinhold, pp. 105-208.
23. Dick, J.S., 2001, **Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance**, Munich, Hanser Gardner Publication, Inc, pp. 23-38.
24. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2552, ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ, หน้า 145-165.
25. พงษ์ธร แซ่อู๋, 2548, กระบวนการผลิตและการทดสอบยาง, พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), หน้า 129 – 140.

26. Johnson, P.S., 2001, **Rubber Processing: An Introduction**, Munich, Hanser Gardner Publication, Inc, pp. 19, 68, 120-123.
27. **หลักการวิเคราะห์ X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF)**, [Online], Available: [Http://www.bestsci.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538907996&Ntype=17](http://www.bestsci.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538907996&Ntype=17) [20 มิถุนายน 2554].
28. **หลักการวิเคราะห์ Infrared Spectroscopy (IR)**, [Online], Available: [Http://las.perkinelmer.com/local/Thailand/AS\\_FTIR.htm](http://las.perkinelmer.com/local/Thailand/AS_FTIR.htm) [20 มิถุนายน 2554].
29. **เทคโนโลยีการสร้างระดับนาโน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน**, [Online], Available: [Http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html) [20 มิถุนายน 2554].
30. **วีระชัย ลามอ, ความแข็ง**, [Online], Available: [Http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep\\_5\\_2550\\_hardness.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_5_2550_hardness.pdf) [20 มิถุนายน 2554].
31. Kevin P, M., 1998, **Dynamic Mechanical Analysis a Practical Introduction**, London, England, pp. 1-65.
32. Lin, L., “**Dynamic Mechanical Analysis Basics and Beyond**”, [Online], Available: [Http://depts.washington.edu/mseuser/Equipment/RefNotes/LinLiDma-SF.pdf](http://depts.washington.edu/mseuser/Equipment/RefNotes/LinLiDma-SF.pdf) [2011, June 21].
33. **Dynamic Mechanical Analysis 242C**, [Online], Available: [Http://www.benelux-scientific.com/fileadmin/user\\_files/pdf/dma/Brochure\\_DMA\\_242-E.pdf](http://www.benelux-scientific.com/fileadmin/user_files/pdf/dma/Brochure_DMA_242-E.pdf) [2011, June 21].
34. Skelhorn, D.A., and Bray, D.J., “**A Comparison of PoleStar 200R with Sillitin Z86 in Light Coloured EPDM Extrusions**”, [Online], Available: [Http://www.imerys-perfmms.com/uploadfiles/8/PFME-R210\\_PoleStar\\_200R\\_calcined\\_kaolins\\_vs\\_siliceous\\_kaolins.pdf](http://www.imerys-perfmms.com/uploadfiles/8/PFME-R210_PoleStar_200R_calcined_kaolins_vs_siliceous_kaolins.pdf) [2011, June 21].

35. Oggermuller, H., “**Improving the Processing Properties of SBR-Silica Compound by the Addition of Neuburg Siliceos Earth**”, [Online], Available: <http://www.hoffmannmineral.com> [2011, June 21].
36. Abdul, K., and Bhowmick, K., 2003. “Effect of filler on the mechanical, dynamic mechanical, and aging properties of binary and ternary blends of acrylic rubber, fluorocarbon rubber, and polyacrylate”, **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 95, No. 1, pp. 278-286.
37. Thongsang, S., Sombatsompop, N., and Ansarifar A., 2008. “Effect of fly ash silica and precipitated silica fillers on the viscosity, cure, and viscoelastic properties of natural rubber”, **Polymer Composite**, Vol. 95, No. 1, pp. 30-40.
38. Degrange, J.-M., Thomine, M., Kapsa, Ph., Pelletier J.M., Chazeau, L., Vigier, G., and Guerb, L., “Influence of viscoelasticity on the tribological behaviour of carbon black filled nitrile rubber (NBR) for Lip seal application”, **Wear**, Vol. 259, Nos. 1-6, pp. 684-692.
39. Geethamma, V.G., Kalaprasadb, G., Groeninckxc, G., and Thomas, S., “Dynamic mechanical behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites”, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 36, No. 11, pp. 1499-1506.
40. Phewphong, P., Saeoui, P., and Sirisinha, C., 2008, “The use of dynamic mechanical thermal analysis technique for determining an uneven distribution of precipitated silica in CPE/NR blend”, **Polymer Testing**, Vol. 27, No. 7, pp. 873-880.
41. Thongsang, S. and Sombatsompop, N., 2006, “Effect of NaOH and Si69 treatments on the properties of fly ash filled NR composites” **Polymer Composites**, Vol. 27, No. 1, pp. 30-40.
42. Mostafa, A., Abouel-Kasem, A., Bayoumi, M.R. and El-Sebaie, M.G., 2008, “Insight into the effect of CB loading on tension, compression, hardness and abrasion properties of SBR and NBR filled compounds”, **Materials & Design**, Vol. 30, No. 5, pp. 1785-1791.

43. Kim, J-T., Lee, D-Y., Oh, T-D., and Lee, D-H., 2003, "Characteristics of nitrile-butadiene rubber layered silicate nanocomposites with silane coupling agent", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 89, No. 10, pp. 2633-2640.
44. Suzuki, N., Ito, M., and Ono, S., 2005, "Effect of rubber/filler interaction on the structure development and mechanical properties of NBR/Silica composite", **Journal of Applied Polymer Science**, Vol. 95, No. 1, pp. 74-81.
45. Choi, S.-S. and Ha, S.-H., 2009, "Influence of the swelling temperature and acrylonitrile content of NBR on the water swelling behaviors of silica-filled NBR vulcanizates", **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Vol. 5, No. 2, pp. 167-170.
46. Sae-oui, P., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K., 2004, "Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent", **Polymer Testing**, Vol. 23, No. 4, pp. 397-403.
47. Warring, R. H., 1981, **Seals and Sealing Handbook**, East Molesey, Surrey, Trade & Technical Press, pp. 1-63.
48. Parker-Hannifin, 2005, **Corporation (Cleveland, OH) Seal ring having secondary sealing lips**, US Patent, No. 6883804.
49. Marrone, M., Montanari, T., Busca, G., Conzatti, L., Costa, G., Castellano, M., and Turturro, A., 2004, "A Fourier Transform Infrared (FTIR) study of the reaction of Triethoxysilane (TES) and Bis[3-triethoxysilylpropyl]tetrasulfane (TESPT) with the surface of amorphous silica", **The Journal of Physical Chemistry. B**, Vol. 108, No. 11, pp. 3563-3572.

50. โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ฝ่ายุคอุตสาหกรรม, 2549, “การใช้น้ำมันพืชทดแทนน้ำมันอะโรมาติกในยางคอมปาวด์”, วิจัยยางพาราเพื่ออนาคตที่ยั่งยืน, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ, หน้า 233-240.
51. วีรยา วรคันธ์, 2553, การศึกษาสมบัติเชิงกลและการสึกหรอของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยร่วมกับซิลิกา, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 62, 73-76.
52. Pita, V.J.R.R., Sampaio, E.E.M., and Monteiro, E.E.C., 2002, “Mechanical properties evaluation of PVC/ plasticizer and PVC/Thermoplastic Polyurethane blends from extrusion processing”, **Polymer Testing**, Vol. 21, No. 5, pp. 545-550.
53. Park, K-W., Kim, G-H., and Chowdhury, S.R., 2008, “Improvement of compression set property of ethylene vinyl acetate copolymer/ethylene-1-butene copolymer/organoclay nanocomposite foams”, **Polymer Engineering and Science**, Vol. 48, No. 6, pp. 1183-1190.

ภาคผนวก ก

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

# ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่การประชุมวิชาการระดับชาติ

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ครั้งที่ 2

## สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต และการคืนกลับตัวทางอีลาสติกของยางเอ็นบีอาร์ ที่มีสารตัวเติมซิลิกาเป็นองค์ประกอบ

Dynamic Mechanical Thermal Properties and Elastic Recovery of Silica Fillers Compound in NBR

ปิยะภรณ์ นิลทуй<sup>1</sup> เอกชัย วิมลมาลา<sup>1</sup> และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ<sup>1</sup>  
Piyporn Niltui<sup>1</sup> Ekachai Wimolmala<sup>1</sup> and Narongrit Sombatsompop<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ประกอบด้วยผงฟริชิตเตดซิลิกา ผงเถ้าลอย และผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิวด้วยสารซิลานบิไซเลน โดยเติมในยางเอ็นบีอาร์ที่มีผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมหลัก และปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิกาที่มีในสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาตั้งแต่ 0-50 ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน ทำการทดสอบค่าความหนืดมูนี การไหลตัวและการบวมตึง สมบัติเชิงกลทางด้าน การยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด ความแข็ง การต้านทานต่อการขีดสี การต้านทานต่อน้ำมันไฮดรอลิก สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต ผลการวิจัยพบว่า การเติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาทำให้ค่าความหนืดมูนีและความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเติมซิลิกาจากเถ้าลอยทำให้เวลาในการบวมตึงเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมผงฟริชิตเตดซิลิกาให้สมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าสารตัวเติมกลุ่มซิลิกานชนิดอื่น ยกเว้นสมบัติการคืนกลับตัวของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงฟริชิตเตดซิลิกาให้ค่าใกล้เคียงกับผงซิลิตินชนิดที่ปรับปรุงผิว สำหรับการต้านทานต่อน้ำมันไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ไม่พบการบวมตัว และสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงฟริชิตเตดซิลิกา และผงซิลิตินชนิดที่ปรับปรุงผิว พบว่า การเติมผงฟริชิตเตดซิลิกามีค่ามอดูลัสสูงสูงกว่าผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว สำหรับค่าแทนเจนต์สูญเสียและอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วของยางเอ็นบีอาร์ที่ไม่ต่างกัน

**คำสำคัญ:** ยางเอ็นบีอาร์/สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต/การคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด/สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา

### ABSTRACT

This research studied the silica based fillers including precipitated silica, fly ash and silitin with and without silane treatment added into carbon black filled acrylonitrile-butadiene rubber (NBR) at various silica loadings from 0 to 50 parts per hundred rubber (phr). Mooney viscosity, scorch time, cure time and mechanical properties; compression set, hardness, abrasion resistance, hydraulic oil resistance, dynamic mechanical thermal properties were of interest. The experimental results suggested that the addition of silica based fillers in the NBR vulcanizates increased the Mooney viscosity and hardness. The addition of silica in fly ash resulted increase of cure time. It was found that the precipitated silica gave the highest overall mechanical properties of the black filled NBR vulcanizates, except for the compression set where the vulcanizates with treated silitin filler had comparable compression set with those with the precipitated silica. For hydraulic oil resistance of the NBR vulcanizates wasn't found swelling and dynamic mechanical analysis (DMA) of NBR vulcanizates with precipitated and silitin silica fillers, it was found that the vulcanizates with precipitated silica filler had higher storage modulus than those with the treated silitin. However, both NBR vulcanizates had similar glass-transition temperature and loss tangent values.

**Key Words:** NBR / Dynamic Mechanical Thermal Analysis / Elastic recovery / Silica fillers

<sup>1</sup> กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Research Group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

E-mail address: Lovein\_bk@hotmail.com

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ครั้งที่ 2

### บทนำ

โดยทั่วไปยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ สามารถปรับปรุงหรือดัดแปรสมบัติด้านต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานได้โดยใช้สารเติมแต่งต่างๆ อาทิเช่น การเติมสารเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกล สารกระตุ้นหรือสารเร่งปฏิกิริยาทำให้ยางมีการสุกตัวได้เร็วขึ้น สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่หน่วงต่อสภาวะโอโซน รังสียูวี สภาวะแวดล้อมได้ดีโดย สารเติมแต่งหรือสารตัวเติมนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก ดังนี้ กลุ่มแรก สารตัวเติมเสริมแรง คือ ผงเขม่าดำ และผงซิลิกา ที่สามารถเพิ่มสมบัติความต้านแรงดึง ความต้านการฉีกขาด และความต้านการขีดถูได้ดี กลุ่มที่สอง เป็นสารตัวเติมที่ใช้ในการเพิ่มเนื้อ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ซอลด์ เบ้ง ดิน เป็นต้น (พรพรรณ, 2528) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งสารตัวเติมกลุ่มเสริมแรงมีความต้องการใช้อย่างต่อเนื่องในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ ผลิตภัณฑ์ยางรับแรงกระแทก ยางซีลกันรั่วหรือซีลและยางขึ้นส่วนในเครื่องจักรกล เช่น ซีลยางในเครื่องยนต์ ชุดเกียร์ส่งกำลัง หรือซีลเพลาขับเคลื่อน ซึ่งวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตซีลยางจะเลือกใช้ยางสังเคราะห์ไนไตรด์ หรือยางเอ็นบีอาร์ (Nitrile rubber: NBR) เนื่องจากมีสมบัติด้านทานน้ำมัน ทนต่อโอโซนและอุณหภูมิการใช้งานค่อนข้างสูง สามารถรับแรง ด้านทานต่อการขีดถูได้ดี มีราคาถูก (พงษ์ธร, 2548) และสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ซีลยางคือมีความสามารถคืนกลับตัวได้ดีเมื่อได้รับแรงกดอัด

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Sombatsompop *et al.* (2008) ได้ศึกษาสารตัวเติมผงเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก โดยเติมในยางธรรมชาติ ยางเอ็นบีอาร์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ พบว่า การเติมผงเถ้าลอยที่ปริมาณ 20 ส่วนต่อปริมาณยางร้อยละ (Parts per hundred rubber, phr) ทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมของยางเพิ่มขึ้น และมีสมบัติคืนตัวด้านการกลับคืนตัวที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมผงฟริชพิเตดซิลิกา ปัจจุบันมีบริษัทเอกชนที่จำหน่ายสารเคมีได้เสนอสารตัวเติมชนิดที่ช่วยเพิ่มสมบัติการกลับคืนตัวยางให้ดีขึ้น โดยการนำซิลิกาจากแร่ Quartz และ Kaolinite มาเป็นสารตัวเติมในยาง มีชื่อทางการค้าว่า ซิลิติน (Silitin) ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักที่ปริมาณ 70% และโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง (Oggermuller, 2010) ซึ่งงานผลิตภัณฑ์ยางซีลต้องการสมบัติการใช้งานการคืนกลับตัวที่สูง ดังนั้นจึงมีความสนใจศึกษาการนำสารตัวเติมซิลิตินเติมในยางเอ็นบีอาร์ โดยเปรียบเทียบกับผงเถ้าลอย และผงฟริชพิเตดซิลิกา ที่เน้นความสามารถในการคืนกลับตัวและสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของยางซีล

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### วัสดุและสารเคมี

ส่วนประกอบของสูตรสารประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 1 ตารางที่ 1 สูตรของสารประกอบยางเอ็นบีอาร์

Ingredients	Contents (phr)	Function	Company
1. NBR (grade KVRNAC 3345F), ACN 33%	100 part	Matrix phase	Chemical Innovations (Thailand) Co., Ltd
2. Zinc oxide (ZnO)	5.0	Activator	Thai-Lysaght (Thailand) Co. Ltd
3. Stearic acid	1.0	Co-Activator	Imperial Industrial Chemicals (Thailand) Co. Ltd
4. Dibenzothiazole disulphide (MBTS)	0.7	Accelerator	Zeon Chemicals (Thailand) Co., Ltd
5. Tetramethylthiuramdisulfide (TMCDS)	2.0	Co-Accelerator	Zeon Chemicals (Thailand) Co. Ltd
6. Sulphur	2.0	Curing Agent	Zeon Chemicals (Thailand) Co. Ltd
7. Aromatic oil	10.0	Plasticizer	Poly Seal Track (Thailand) Co., Ltd
8. Carbon black (grade N 550)	50.0	Reinforcing Agent	Thai Carbon Black Public (Thailand) Co., Ltd
9. Filler (Silica base)	Varying from 6-50	Co-Reinforcing Agent	Tokuyama Siam Silica (Thailand) Co., Ltd
Precipitated silica			K.N.R. Group (Thailand) Co., Ltd
-Silica from Fly ash			Behm Meyer Chemicals (T) (Thailand) Co., Ltd
-Silica from Silitin grade Z86 (Untreated), Aktisil PF.116 (Treated)			

#### การผสมและเตรียมชิ้นงานยางกับสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา

ในงานวิจัยนี้ทำการปรับผงเถ้าลอย และฟริชพิเตดซิลิกาด้วยสารคู่ควบโซเลนชนิด Bis-(3-methoxysilypropyl) tetrasulfide,  $[(C_2H_5O)_3-Si-(CH_2)_3-S_2-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$ , (Couplink 89) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) โดยเตรียมสารคู่ควบโซเลนที่ปริมาณความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (จุลพันธ์, 2552) เพื่อให้สารตัวเติมกระจายในยางได้ดี ทำการผสมยางเอ็นบีอาร์กับผงเขม่าดำที่เป็นสารตัวเติมหลัก ปริมาณ 50 phr และสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ดังนี้ ผงฟริชพิเตดซิลิกา ผงเถ้าลอย และผงซิลิตินทั้ง 2 ชนิด (ปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว)

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ครั้งที่ 2

สารเคมีอื่นๆ ตามส่วนประกอบของสารประกอบยางเอ็นบีอาร์ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิกาที่มีในสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณสัดส่วน 0 10 20 30 40 และ 50 ส่วนต่อปริมาณยางร้อยละ ด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จากบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด ใช้เวลาในการผสมที่ 30 นาที อุณหภูมิผสมในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้น นำสารประกอบยางเอ็นบีอาร์ขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression moulding) จากบริษัท Lab Tech จำกัด อุณหภูมิในการขึ้นรูป 170 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 160 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต การคืนกลับตัวทางอีลาสติกและการต้านทานต่อการขีดข่วน

#### การทดสอบความเหนียว การไหลและการบ่มสุก สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต ความแข็ง และการทนต่อน้ำมัน

ทดสอบความเหนียวของยางคอมปาวด์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน (ISO 289-1) ด้วยเครื่อง Mooney viscometer จากบริษัท Alpha Technologies Service Inc รุ่น ALPHA TM24 SIE2338 ประเทศสหรัฐอเมริกา ทดสอบเวลาการไหลและบ่มสุกของยางคอมปาวด์ ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) จากบริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 ประเทศไต้หวัน ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ทดสอบการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด ตามมาตรฐาน ASTM D395-03 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ทดสอบความแข็งของชิ้นงานยาง ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 (Shore A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง จากบริษัท Tech Lock จำกัด ทดสอบการต้านทานต่อการขีดข่วน ตามมาตรฐาน DIN 53516 ด้วยเครื่อง DIN abrader จากบริษัท Hampden Test Equipment จำกัด ทดสอบการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D471-06 และสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตแบบการดึง ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 100 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ความถี่ 1 ครั้งต่อวินาที แอมพลิจูด 30 ไมโครเมตร ด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer จากบริษัท Netzsch รุ่น 242 ประเทศเยอรมนี

#### การพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา

การคัดแยกขนาดอนุภาคผงเถ้าลอยด้วยตะแกรงร่อนขนาดไม่เกิน 125 ไมครอน ตรวจจอสอบหมู่ฟังก์ชันเคมีของสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer (Spectrum one ประเทศสหรัฐอเมริกา) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ยี่ห้อ HORIBA (MESA-500W ประเทศญี่ปุ่น)

#### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงฟริชิตเตดซิลิกา ผงเถ้าลอย ผงซิลิตินชนิดที่ปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงเถ้าลอย และผงซิลิตินด้วยเทคนิค XRF พบว่า ผงเถ้าลอย ผงซิลิตินทั้ง 2 ชนิด (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว) มีซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก ที่ปริมาณตามลำดับดังนี้ 30.1% 72.6% และ 73.5% และมีกลุ่มโลหะออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ จากงานวิจัยของฐิติพันธ์ (2552) รายงานว่าผงฟริชิตเตดซิลิกามีปริมาณซิลิกา 98.8% เมื่อทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของผงเถ้าลอย และผงซิลิติน ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า ผงเถ้าลอย และผงซิลิตินมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่นในช่วง 3433-3442  $\text{cm}^{-1}$  หมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่นในช่วง 1631-1638  $\text{cm}^{-1}$  และหมู่ไฮดรอกเซนที่เลขคลื่นในช่วง 1013-1116  $\text{cm}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่นดังกล่าวมีความคล้ายกับฟริชิตเตดซิลิกา (Thongsang *et al.*, 2006) ที่สามารถใช้ทดแทนสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในยางเอ็นบีอาร์ได้

การศึกษาความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าความเหนียวของยางเพิ่มขึ้นตามปริมาณของซิลิกาในสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาแต่ละชนิด นอกจากนี้พบว่า การเติมผงฟริชิตเตดซิลิกาในปริมาณ 50 phr ส่งผลทำให้ยางมีความเหนียวมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของซิลิกาที่มากที่สุด ส่วนการเติมผงเถ้าลอยในยางทำให้ยางมีความเหนียวต่ำกว่าการเติมผงฟริชิตเตดซิลิกา เนื่องจากมีปริมาณของซิลิกาที่น้อยและมีอนุภาคค่อนข้างกลม ทำให้มีการไหลตัวได้ง่าย (Thongsang *et al.*, 2008) ส่วนในกรณีการเติมผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวทำให้ยางมีความเหนียวต่ำกว่าผงซิลิตินชนิดไม่ปรับปรุงผิว ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงผิวทำให้ผงซิลิตินมีการกระจายตัวในยางได้ดี

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ครั้งที่ 2

ตารางที่ 2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงพรีซิพิตีเตดซิลิกา ผงเถ้าลอย ผงซิลิติน (ชนิดปรับปรุงผิวและไม่ปรับปรุงผิว)

Characterization method	Type of filler			
	Precipitated silica	Flyash	Silitin (Treated)	Silitin (Untreated)
Functional group investigation: FTIR				
Wavenumber (cm <sup>-1</sup> )				
Silanol group OH stretching	3434	3447	3435	3440
OH stretch Vibration	1630	1628	1631	1638
Siloxane group Si-O-Si Stretching	1107	1023	1116	1113
Particle size distribution measurement (µm)				
	<40 (µm)	<125		<10
Chemical composition investigation: XRF				
Chemical composition (%)				
Silicon oxide (SiO <sub>2</sub> )	98.5	90.1	72.6	73.5
Alumina oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	18.4	12.9	15.2
Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-	13.3	0.8	0.9
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	1.2	2.8	0.5	0.4
Calcium oxide (CaO)	-	21.4	0.2	0.1
Other metal oxide	-	8.9	11.1	9.9
TiO <sub>2</sub> , MgO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , SO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, MnO, BaO and ZnO				

นอกจากนี้ ทำการศึกษาสมบัติการไหล การบ่มสุก การคืนกลับตัวทางอีลาสติก ความแข็ง การทนต่อน้ำมันไฮดรอลิก สมบัติเชิงกลด้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัด และการต้านทานต่อการขีดข่วนของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยพบว่า เมื่อเติมชนิดและปริมาณของสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาทั้ง 3 ชนิด ในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ เวลาการไหล (Scorch time) มีค่าที่ไม่แตกต่างกัน และไม่ส่งผลต่อเวลาการบ่มสุก (Cure time) ของยาง ยกเว้นการเติมปริมาณซิลิกาจากผงเถ้าลอยทำให้เวลาในการบ่มสุกยางเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ผงเถ้าลอยมีส่วนประกอบของโลหะออกไซด์ที่สามารถเกิดการหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของสายโซ่กับส่วนที่มีขั้ว (-CN groups) ของยางเอ็นบีอาร์จึงส่งผลทำให้เวลาการบ่มสุกยางเพิ่มขึ้น (Kantala et al., 2009)

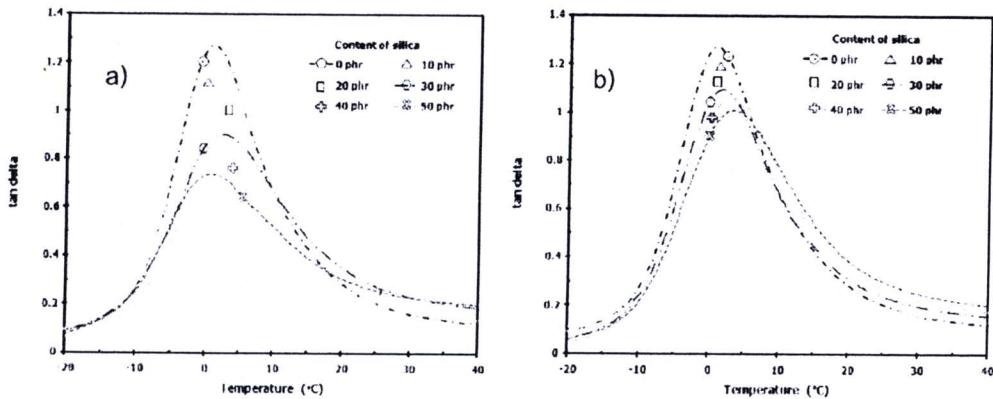
ตารางที่ 3 สมบัติการไหล การบ่มสุก สมบัติเชิงกล และการทนน้ำมันของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์

Type of silica	Content of silica (phr)	NBR composite properties							
		Mooney viscosity (ML (1-1) 100°C)	Cure characteristic		Mechanical properties		Volume loss (mm <sup>3</sup> )	Swelling ratio (%)	
			Scorch time (min:sec)	Cure time (min:sec)	Compression set (%)	Hardness (Shore A)		at 30°C	at 125°C
No filler	0	51.6	1:01	2:42	17±2	73±1	103.3	0	3
Precipitated silica	10	54.4	0:59	2:30	26±1	72±1	95.7	0	3
	20	59.7	0:53	2:21	25±1	76±1	109.6	0	3
	30	65.9	0:53	2:30	26±1	78±1	111.7	0	3
	40	82.3	0:54	2:30	27±1	82±1	105.0	0	3
	50	59.1	0:55	2:32	24±1	82±1	100.3	0	3
Silica from Fly ash	10	58.0	1:00	3:20	17±2	76±1	169.3	0	3
	20	61.5	0:55	4:23	24±2	80±1	198.5	0	3
	30	69.3	0:56	5:34	29±2	82±1	203.0	0	3
	40	72.3	0:49	7:23	29±2	83±1	241.0	0	3
	50	76.3	0:49	9:17	34±2	91±1	265.0	0	3
Silica from Silitin (Treat)	10	45.7	0:57	2:28	25±1	77±1	115.9	0	3
	20	52.6	0:57	2:34	26±1	79±1	111.3	0	3
	30	62.1	0:54	2:17	26±1	87±1	130.3	0	3
	40	67.3	0:54	2:12	24±1	87±1	123.9	0	3
	50	69.6	0:54	2:12	22±1	85±1	127.6	0	3
Silica from Silitin (Un-Treat)	10	54.7	0:58	2:30	28±2	76±1	135.1	0	3
	20	58.2	1:00	2:30	24±2	77±1	124.0	0	3
	30	71.5	0:58	2:15	31±2	79±1	164.6	0	3
	40	73.0	1:00	2:05	35±2	80±1	153.3	0	3
	50	83.1	0:54	2:05	34±2	83±1	161.2	0	3

ส่วนสมบัติด้านการยุบตัวเมื่อได้รับแรงกดอัดของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์อยู่ในช่วง 17-34% ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า การเติมผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวให้ค่าการกลับคืนตัวใกล้เคียงกับผงพรีซิพิตีเตดซิลิกา ทั้งที่มีปริมาณซิลิกาน้อยกว่า นอกจากนี้ ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาจากสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอนุภาคสารตัวเติมกลุ่มซิลิกามีความแข็งแรง (Rigidity) ส่งผลให้ความแข็งของยางโดยรวมเพิ่มขึ้นด้วย ในงานวิจัยนี้เน้นการใช้งานด้านซีลยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน และมีการขีดข่วนใช้งานจึงทำการทดสอบการทนน้ำมัน ไฮดรอลิก ที่สภาวะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส พบว่า วัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมกลุ่ม ซิลิกาทุกชนิดต้านทานต่อการบวมตัวใน

น้ำมันไฮดรอลิกได้ดีทั้งสองสภาวะ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของยางเอ็นบีอาร์สามารถต้านทานต่อการแทรกตัวของน้ำมันได้ดี ส่วนการทดสอบการทนต่อการขีดสีของยางเอ็นบีอาร์ พบว่า การเติมปริมาณของซิลิกาจากสารตัวเติมกลุ่ม ซิลิกา (ผงพรีซิพิเตดซิลิกา ผงซิลิติน) มีการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการขีดสีค่อนข้างน้อย ยกเว้นการเติมปริมาณซิลิกาจากผงถ่านคอกมีการสูญเสียเนื้อวัสดุจากการขีดสีมากที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนของซิลิกาที่น้อย ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งปริมาณซิลิกาที่มีปริมาณน้อยส่งผลทำให้มีการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลง การเสริมแรงระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลงด้วย ซึ่งอนุภาคถ่านคอกที่หลุดออกมาส่งผลทำให้ปริมาณเนื้อวัสดุโดยรวมลดลง และอาจเนื่องจากอนุภาคผงถ่านคอกที่มีขนาดใหญ่เมื่อเกิดการหลุดออกเป็นตัวเร่งการขีดตัวทำให้เนื้อยางมีการหลุดออกได้เพิ่มขึ้น

**การทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต**



รูปที่ 1 tan delta ยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติม a) ผงพรีซิพิเตดซิลิกา b) ผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว

ตารางที่ 4 สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์

Type of silica	Content (phr)	DMTA results	
		T <sub>g</sub> (°C)	E' at 30°C (MPa)
Unfilled silica	0	0.1	14.22
	10	1.6	17.50
	20	0.7	20.27
	30	2.2	32.60
	40	1.6	42.64
	50	1.4	54.18
Silirin (Treated)	10	-0.3	15.86
	20	2.3	21.09
	30	1.7	21.83
	40	2.7	25.10
	50	3.2	31.58

จากผลการทดลองที่กล่าวมาดังตารางที่ 3 พบว่า ยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวให้สมบัติโดยรวมที่ใกล้เคียงกับผงพรีซิพิเตดซิลิกา จึงเลือกนำมาทดสอบสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงค่า Storage modulus ของยางเอ็นบีอาร์ที่สารตัวเติมผงพรีซิพิเตดซิลิกา และผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 0-50 phr ในปริมาณที่ต่างกัน โดยพบว่า ค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกามีค่ามากกว่าที่ไม่มีสารตัวเติม เมื่อเปรียบเทียบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงพรีซิพิเตดซิลิกากับผงซิลิติน พบว่า ค่า Storage modulus ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงพรีซิพิเตดซิลิกามีค่าสูงกว่าผงซิลิติน นอกจากนี้ ค่า Storage modulus เพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกา สำหรับค่า tan delta ดังแสดงในรูปที่ 1a และ 1b ของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงพรีซิพิเตดซิลิกามีค่าน้อยกว่าการไม่เติม ส่วนค่า tan delta ยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงพรีซิพิเตดซิลิกามีค่าน้อยกว่าผงซิลิติน และค่า tan delta ลดลงตามปริมาณของซิลิกา เนื่องจากผงพรีซิพิเตดซิลิกามีปริมาณของซิลิกาที่มากกว่าผงซิลิติน จึงเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างยางกับสารตัวเติม (Rubber-filler interaction) และสามารถเสริมแรงได้ดี (Kader, 2003) ส่งผลทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงพรีซิพิเตดซิลิกาดีกว่าการเติมจากผงซิลิติน เมื่อพิจารณาจากค่า T<sub>g</sub> ของวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ครั้งที่ 2

ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ค่า  $T_g$  ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของซิลิกาในสารตัวเติมผงฟริฟิเตดซิลิกาและผงซิลิตินปรับปรุงผิวในวัสดุประกอบยางเอ็นบีอาร์ ซึ่งบ่งบอกถึงการเสริมแรง (Reinforcement) ของสารตัวเติมในยางเอ็นบีอาร์ (Kader, 2003)

#### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสารตัวเติมกลุ่มซิลิกาประกอบด้วย ผงฟริฟิเตดซิลิกา ผงเถ้าลอย และผงซิลิติน ในวัสดุเชิงประกอบยางเอ็นบีอาร์สามารถสรุปได้ดังนี้ ผงเถ้าลอยและผงซิลิตินมีหน่วงที่กันไซเลนอลและไซลอคเซน เหมือนกับผงฟริฟิเตดซิลิกานอกจากนี้ พบว่า ผงฟริฟิเตดซิลิกาให้ความหนืดสูงสุด และการเติมผงเถ้าลอยทำให้เวลาการบวมสูงกว่าการเติมสารตัวเติมชนิดอื่น ส่วนสมบัติเชิงกลโดยรวมของผงฟริฟิเตดซิลิกาสูงกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ยกเว้นสมบัติการคืนกลับตัวเมื่อได้รับแรงกดอัดซึ่งผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิวให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผงฟริฟิเตดซิลิกา และไม่พบการการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกของยางเอ็นบีอาร์ สำหรับสมบัติความร้อนเชิงกลพลวัตของวัสดุประกอบยางเอ็นบีอาร์ที่เติมผงฟริฟิเตดซิลิกามีค่า Storage modulus สูงกว่าผงซิลิตินชนิดปรับปรุงผิว สำหรับค่า  $\tan \delta$  และ  $T_g$  ให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

#### การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

สำหรับงานวิจัยสามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้งานของซิลิกาที่ใช้ในงานระบบไฮดรอลิกที่มีความสามารถคืนกลับตัวได้ดีในสภาวะการกดอัด

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยฯ ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สัญญาเลขที่ MRG-WI525S074 ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทุนวิจัย บริษัท พาวเวอร์ซิล จำกัด ที่ร่วมสนับสนุนทุนวิจัยและสาระเคมียาง และบริษัทเป็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุผงซิลิติน

#### เอกสารอ้างอิง

- ฐิติพันธ์ พิณชูเยี่ยม, 2552. **สมบัติทางกลและทนน้ำมันของยางผสมผงเถ้าลอย/ยางเอ็นบีอาร์/ยางเอชเอ็นบีอาร์ ที่เติมด้วยผงซิลิกาและการคาร์บอนแบล็ค**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- พาสักร แซ่ฮุย, 2548. **ยาง, ชนิด สมบัติ และการใช้งาน**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). กรุงเทพฯ. 2-66.
- พรพรรณ นิธิอุทัย, 2528. **สารเคมีสำหรับยาง**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 173-175.
- Kader, M. A., and Showmick, A.K. 2003. **Effect of Filler on the Mechanical, Dynamic Mechanical, and Aging Properties of Binary and Ternary Blends of Acrylic Rubber, Fluorocarbon Rubber, and Polyacrylate**. *J Appl Polym Sci* 90: 276-286.
- Oggerruller, H. **Improving the Processing Properties of SBR-Silica Compound by the Addition of Neuburg Siliceos Earth**. [Online]. Available: <http://www.hoffmannmineral.com> [2010, August 3]
- Kantala, C., Wilmolmala, E., Sinsinha, C., and Sombatsompop, N. 2009. **Reinforcement of Compatibilized NR/NBR Blend by Fly Ash Particles and Precipitated Silica**. *Polym Adv Techn* 20: 448-458.
- Thongsang, S., Sombatsompop, N., and Ansanfa, A. 2008. **Effect of Fly Ash Silica and Precipitated Silica Fillers on the Viscosity, Cure, and Viscoelastic Properties of Natural Rubber**. *Polym Adv Techn* 19: 1296-1304.
- Thongsang, S., and Sombatsompop, N. 2006. **Effect of NaOH and Si69 Treatments on the Properties of Fly Ash/Natural Rubber Composites**. *Polym Compos* 27: 30-40.

## ภาคผนวก ข

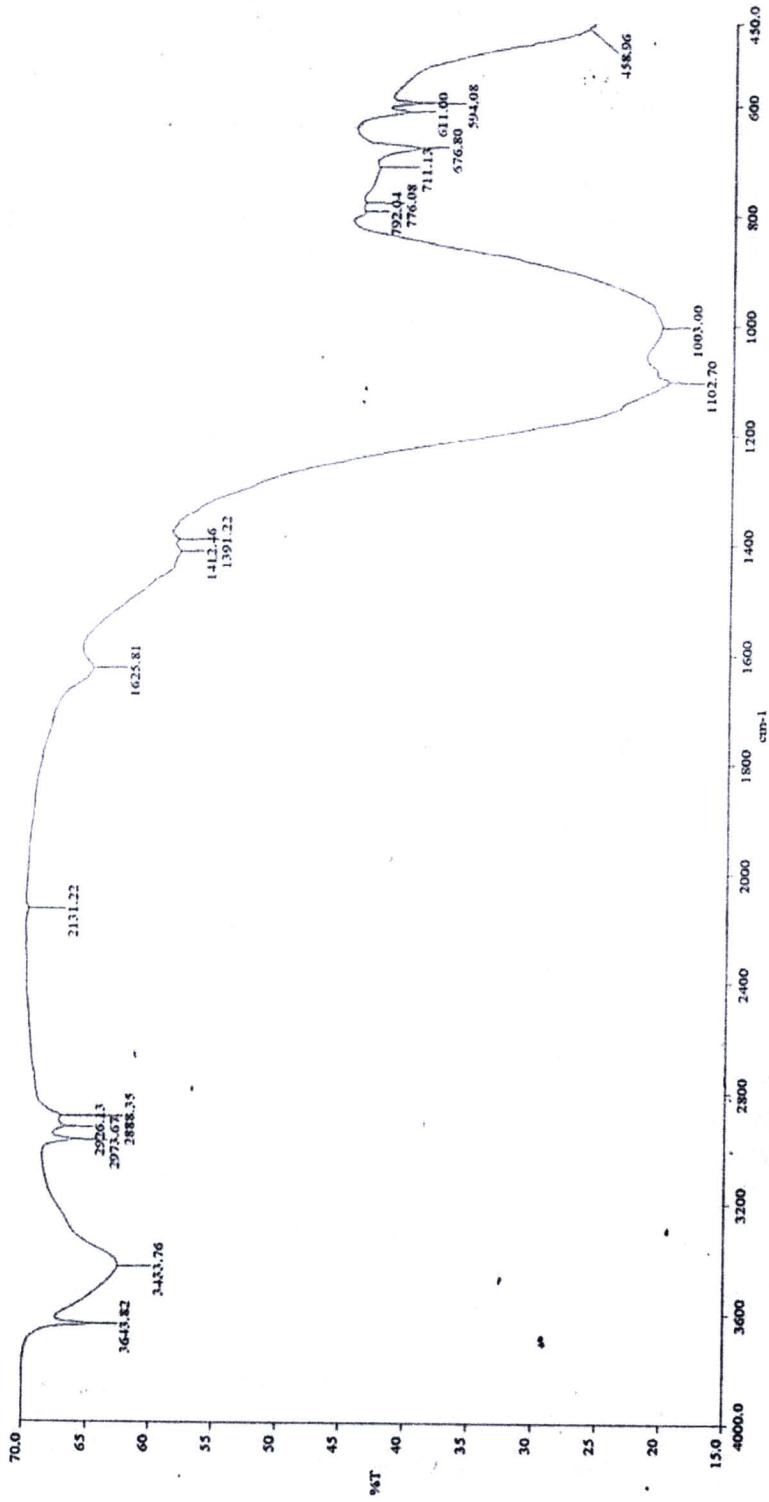
กราฟผลการทดลองจากเครื่องทดสอบ



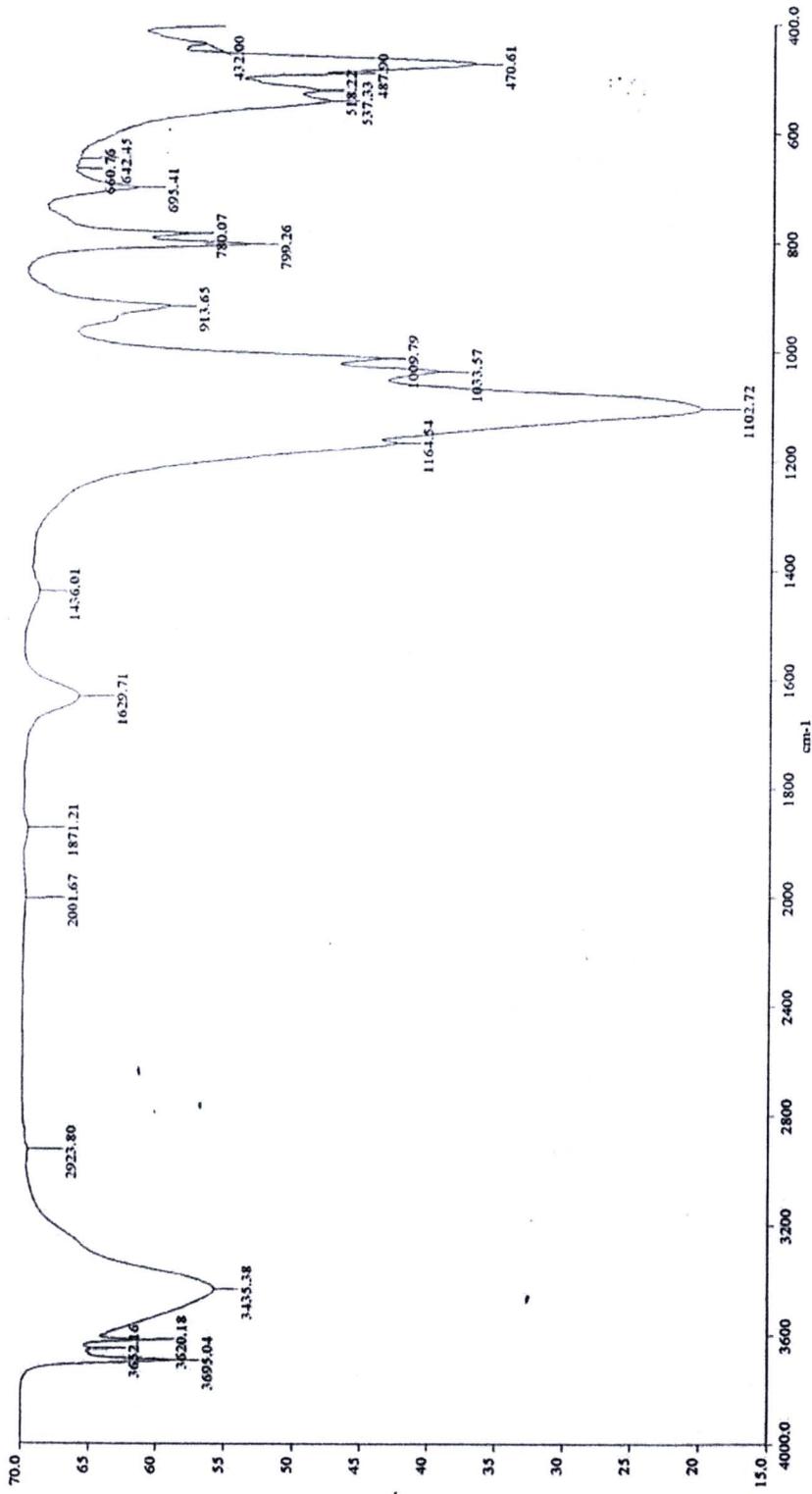
### กราฟผลการทดลองจากเครื่องทดสอบ

- กราฟ FTIR สารตัวเติมถั่วลอ่ยที่ปรับปรุงผิว ซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) และเกรด Z86 (ชนิดไม่ปรับปรุงผิว)
- กราฟ Scorch time และ Cure time ของยางเอ็นบีอาร์ผสมกับสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr
- กราฟ Scorch time และ Cure time ของยางเอ็นบีอาร์ผสมกับสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ถั่วลอ่ย ซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) และเกรด Z86 (ชนิดไม่ปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 0-50 phr และปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10 phr
- กราฟ Storage modulus Loss modulus และ Tan  $\delta$  ของยางเอ็นบีอาร์ผสมกับสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา ถั่วลอ่ย และซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10-40 phr
- กราฟ Storage modulus Loss modulus และ Tan  $\delta$  ของยางเอ็นบีอาร์ผสมกับสารตัวเติมพีซีพีเตตซิลิกา และซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 0-50 phr และปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10 phr

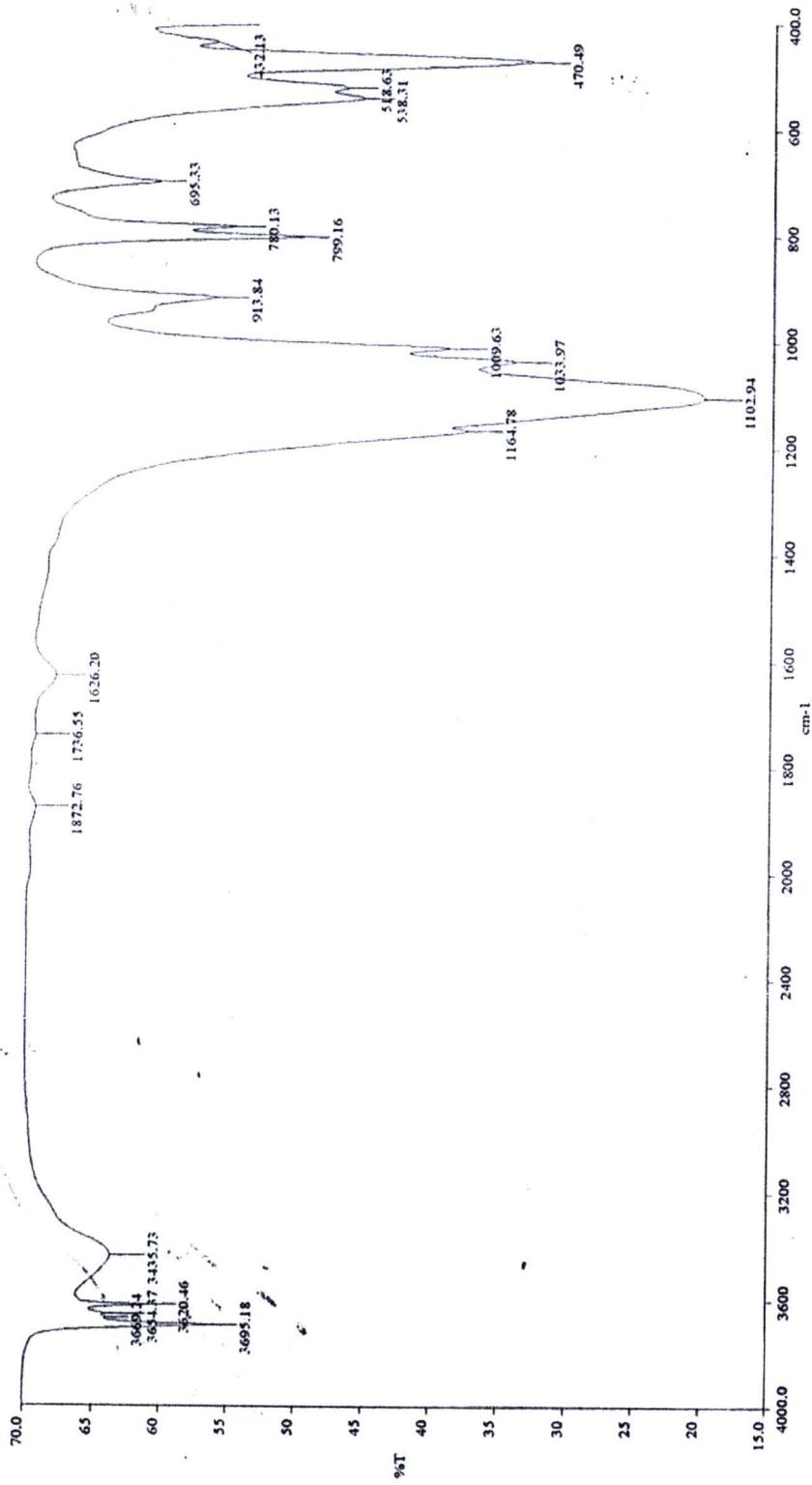
### ผลการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR



รูปที่ ข.1 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR ของสารตัวเดิมเดิมโดยการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Couplink 89 C



รูปที่ ข.2 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR ของสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 ชนิดปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน Couplink 89 C

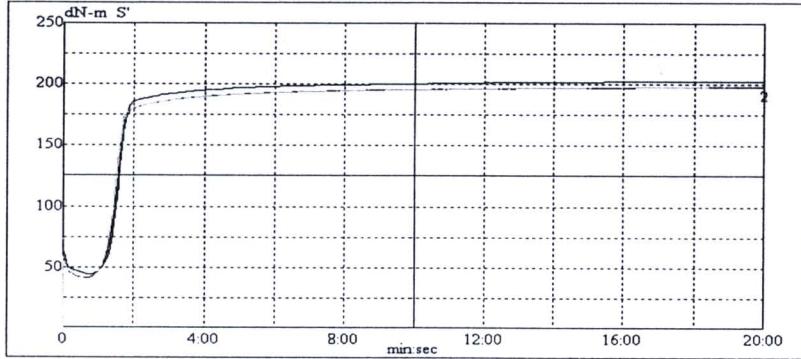


รูปที่ ข.3 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR ของสารตัวเติมชนิดอินเกรต Z86 ชนิดไม่ปรับรูปร่างด้วยสารตัวควบไซเทเลน Couplink 89C

## ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PSI/oil 10 NBR re	0.59	1.04	2.08	202.088	44.065	158.023
2	PSI/oil 10 NBR re	0.53	0.58	2.20	197.546	41.285	156.261
3	PSI/oil 10 NBR re	0.51	0.54	2.20	197.953	41.421	156.532

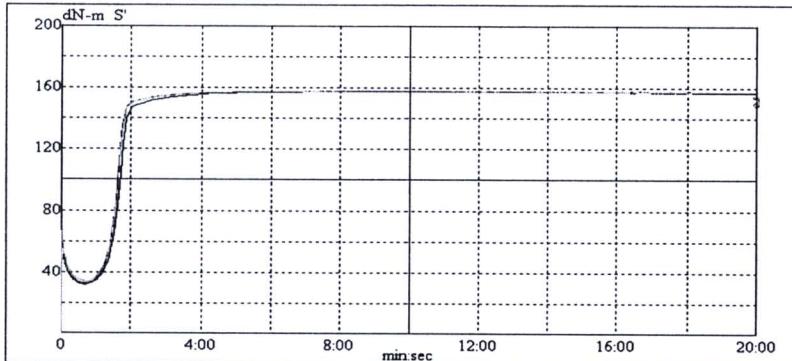
GOTECH



รูปที่ ข.4 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีซีพีเตดซิลิกาที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PSI/Oil 20	0.57	1.02	2.03	157.413	31.794	125.619
2	PSI/Oil 20	0.53	0.58	1.53	157.617	32.472	125.144
3	PSI/Oil 20	1.02	1.02	1.54	157.820	34.167	123.653

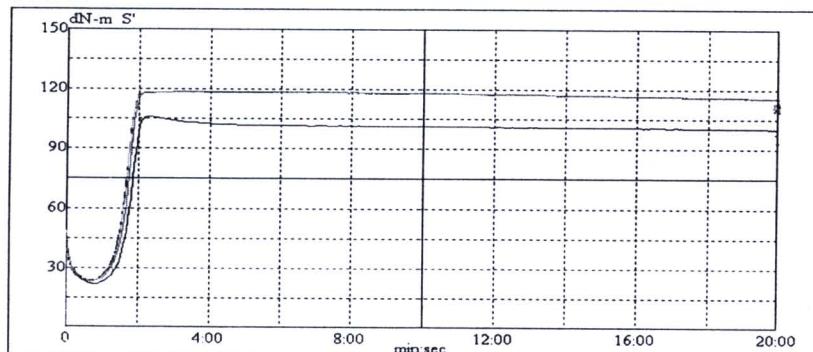
GOTECH



รูปที่ ข.5 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีซีพีเตดซิลิกาที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PS/Oil 30	1.01	1.08	2.01	105.552	21.829	83.723
2	PS/Oil 30	1.03	1.03	1.60	117.958	23.456	94.502
3	PS/Oil 30	0.55	1.02	1.55	118.297	23.185	95.112
4	PS/Oil 30	1.02	1.11	2.03	118.568	22.981	95.587

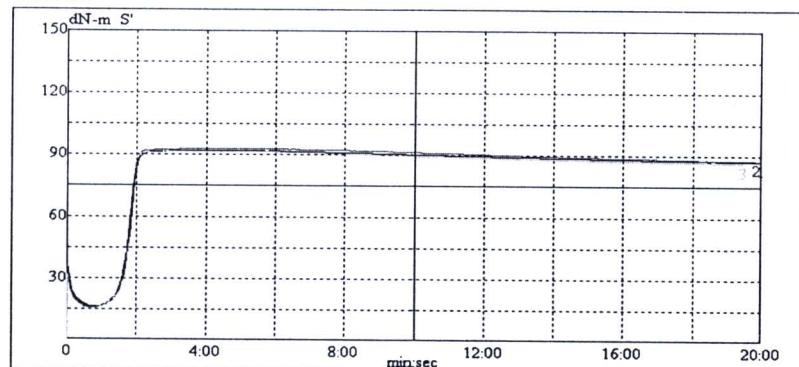
GOTECH



รูปที่ ข.6 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 30 phr

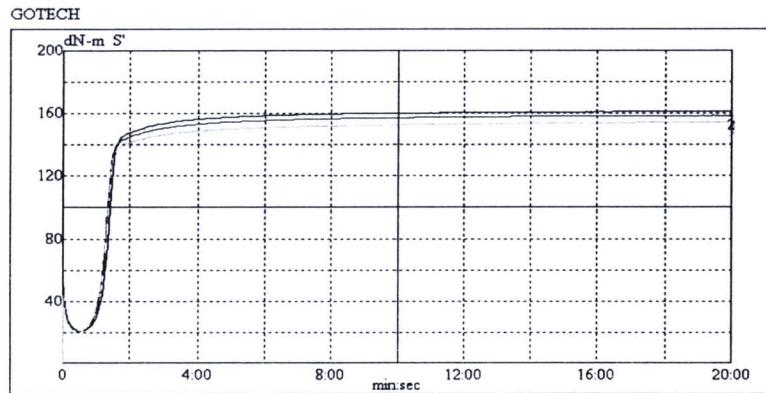
No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PS/Oil 40	1.07	1.14	2.03	91.790	15.999	75.792
2	PS/Oil 40	1.03	1.13	2.02	92.740	15.660	77.080
3	PS/Oil 40	1.03	1.11	1.60	91.384	15.253	76.131

GOTECH



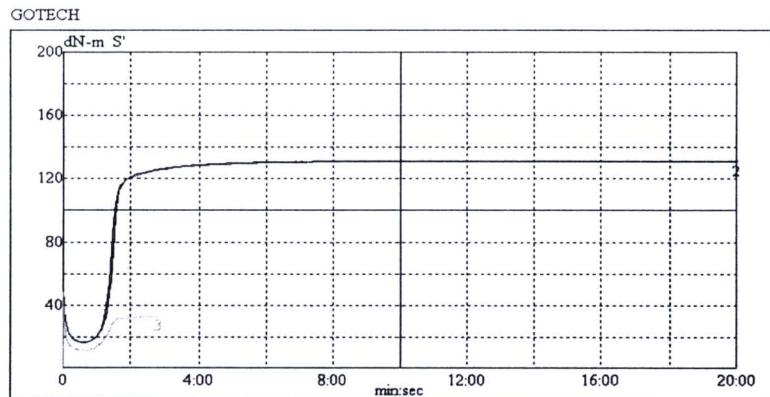
รูปที่ ข.7 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซิพิตเตดซิลิกาที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 40 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PF216/ oil 10 NBR	0.47	0.52	2.00	160.938	20.812	140.126
2	PF216/ oil 10 NBR	0.41	0.46	2.02	158.159	20.473	137.686
3	PF216/ oil 10 NBR	0.41	0.46	2.01	154.024	20.744	133.279



รูปที่ ข.8 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr

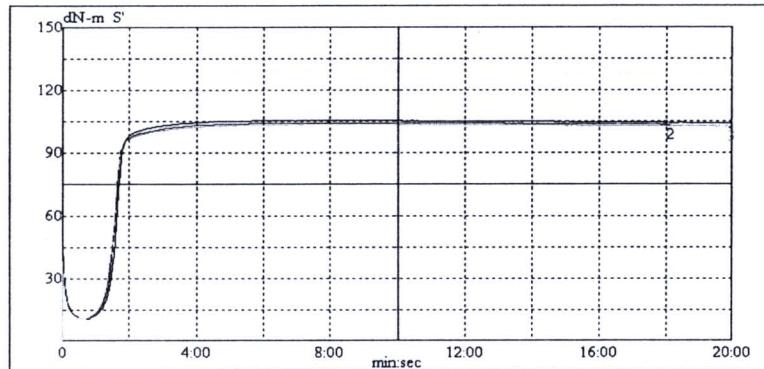
No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	ts2 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PF216/Oil 20	0.52	1.59	0.57	131.178	16.406	114.772
2	PF216/Oil 20	0.49	1.58	0.54	130.568	16.067	114.501
3	PF216/Oil 20	0.53	1.38	0.60	33.083	11.253	21.829



รูปที่ ข.9 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	ts2 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PF216/Oil 30	0.57	1.57	1.02	105.213	10.576	94.638
2	PF216/Oil 30	0.54	1.56	0.59	104.061	10.643	93.417
3	PF216/Oil 30	1.00	1.59	1.00	103.247	10.711	92.536

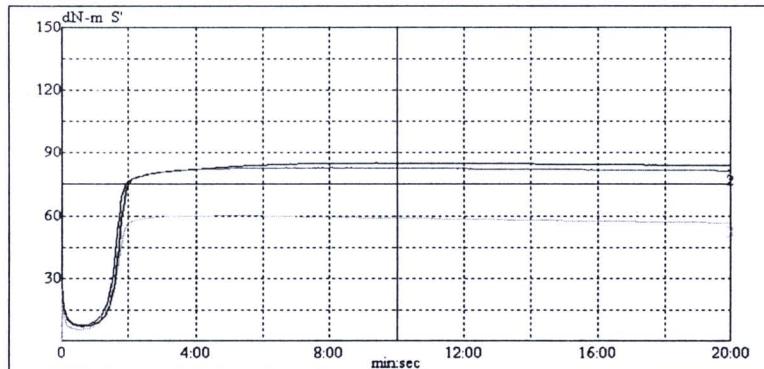
GOTECH



รูปที่ ข.10 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 30 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	PF216/Oil 40 Y0.59	1.08	1.08	2.12	84.876	6.915	77.961
2	PF216/Oil 40 Y0.54	1.02	1.02	1.60	82.571	7.525	75.046
3	PF216/Oil 40 Y0.58	1.08	1.08	2.01	60.132	5.491	54.640

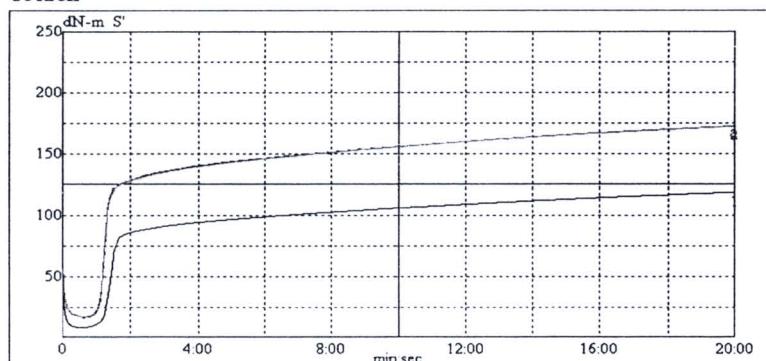
GOTECH



รูปที่ ข.11 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 40 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	FA/Oil 20	1.00	1:10	11:14	118.636	7.999	110.637
2	FA/Oil 20	0.52	0:57	10:26	172.124	16.338	155.786
3	FA/Oil 20	0.51	0:54	10:35	171.853	16.745	155.108
4	FA/Oil 20	0.54	0:59	10:37	172.463	17.016	155.447

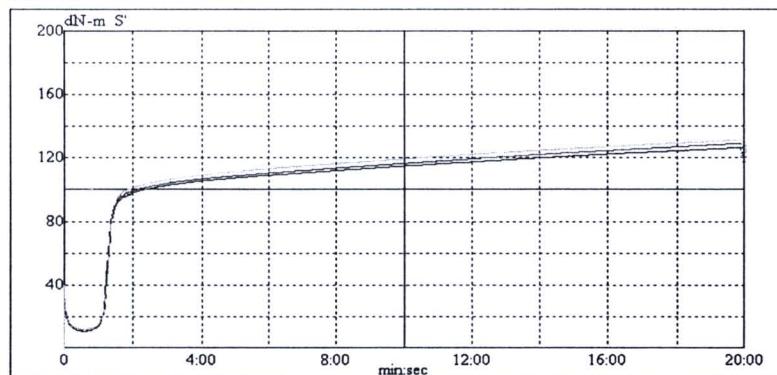
GOTECH



รูปที่ ข.12 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมเกล็ดลวที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20 phr

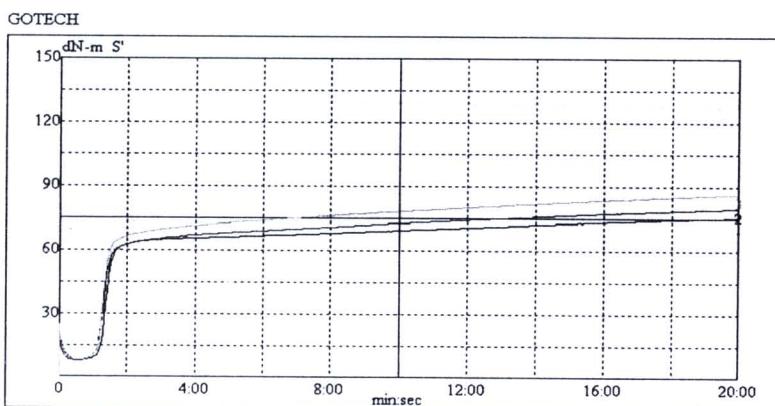
No.	Material	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	FA/Oil 30	0.52	0:57	10:13	126.161	10.372	115.789
2	FA/Oil 30	0.50	0:57	10:35	128.669	10.237	118.433
3	FA/Oil 30	0.51	0:58	10:15	131.178	11.525	119.653

GOTECH



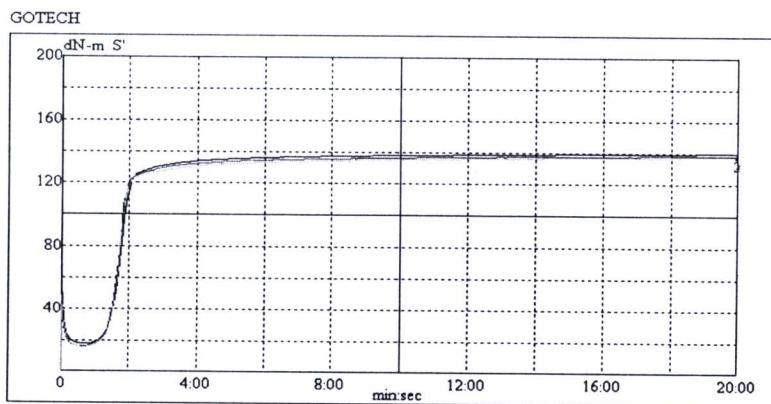
รูปที่ ข.13 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมเกล็ดลวที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 30 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	FA/Oil 40	1:00	1:08	9:07	75.249	7.864	67.385
2	FA/Oil 40	0:57	1:07	10:04	79.520	7.796	71.724
3	FA/Oil 40	0:57	1:02	10:39	86.299	8.067	78.232



รูปที่ ข.14 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลอ่ยที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 40 phr

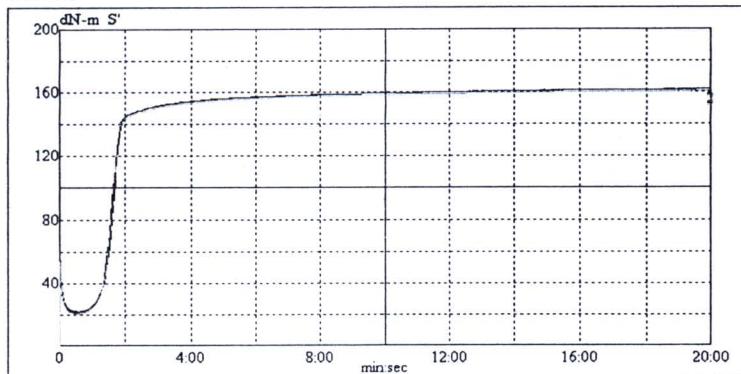
No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/PSI 10	1:01	1:11	2:26	139.516	17.626	121.890
2	NBR/PSI 10	1:03	1:03	2:31	137.889	15.863	122.026
3	NBR/PSI 10	0:59	1:06	2:34	137.211	15.389	121.822



รูปที่ ข.15 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซิพิเตดซิลิกาที่ปริมาณ 10 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/PSI 20	0.54	0.59	2.17	161.345	21.829	139.516
2	NBR/PSI 20	0.49	0.54	2.20	161.481	21.083	140.397
3	NBR/PSI 20	0.48	0.58	2.20	160.125	19.999	140.126

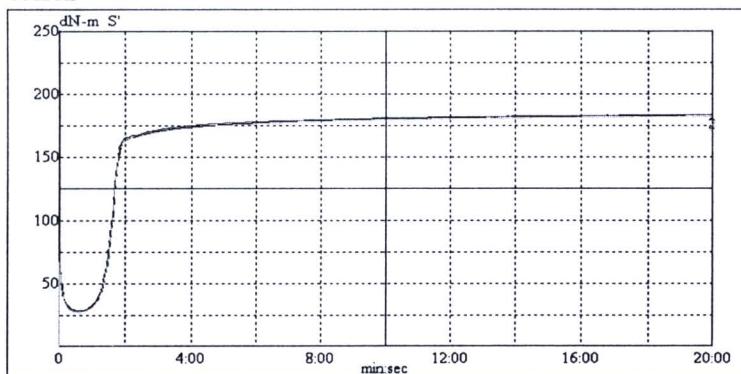
GOTECH



รูปที่ ข.16 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซิปิตเตดซิลิกา  
ที่ปริมาณ 20 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/PSI 30	0.55	0.60	2.34	183.039	28.337	154.702
2	NBR/PSI 30	0.53	0.58	2.24	183.310	28.269	155.040
3	NBR/PSI 30	0.51	0.56	2.31	181.751	27.252	154.498

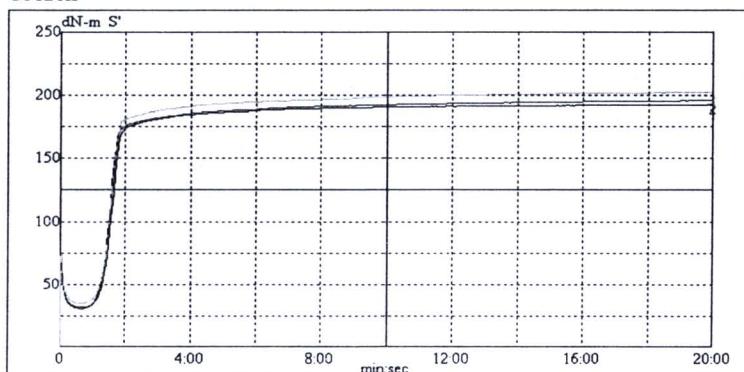
GOTECH



รูปที่ ข.17 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซิปิตเตดซิลิกา  
ที่ปริมาณ 30 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/PSI 40	0.57	0.60	2.16	192.191	31.252	160.938
2	NBR/PSI 40	0.54	0.59	2.31	195.716	30.303	165.413
3	NBR/PSI 40	0.60	0.60	2.38	202.088	34.506	167.582

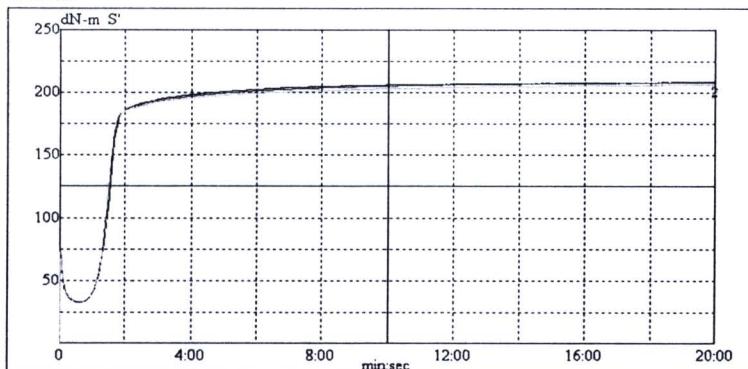
GOTECH



รูปที่ ข.18 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีซีพีเตดซิลิกา  
ที่ปริมาณ 40 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	14/6/2010 NBR/PSI 50	0.55	0.55	2.31	208.122	32.608	175.514
2	14/6/2010 NBR/PSI 50	0.50	0.60	2.37	207.444	32.608	174.836
3	14/6/2010 NBR/PSI 50	0.48	0.53	2.28	205.817	33.083	172.734

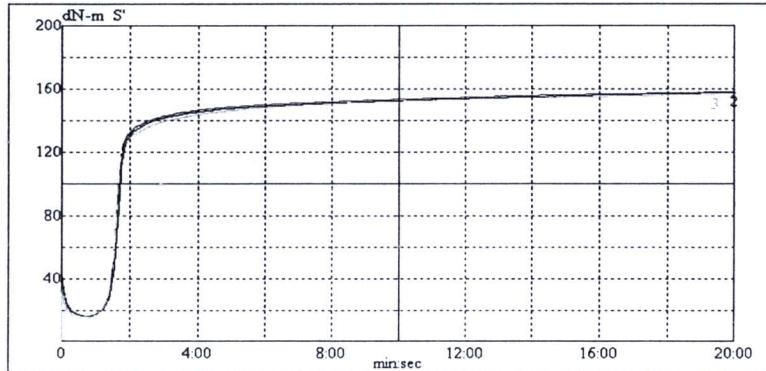
GOTECH



รูปที่ ข.19 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีซีพีเตดซิลิกา  
ที่ปริมาณ 50 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/FA10	1.03	3.26	157.278	16.067	141.211
2	NBR/FA10	0.59	3.13	157.820	15.863	141.957
3	NBR/FA10	0.57	3.40	156.125	14.643	141.482

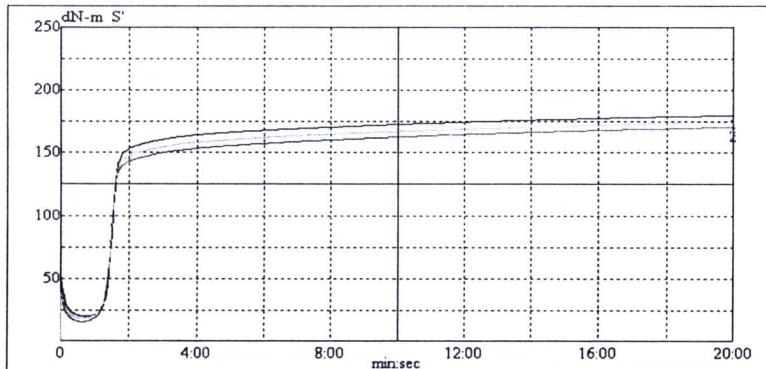
GOTECH



รูปที่ ข.20 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลันเตาที่ปริมาณ 10 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/FA20	0.59	3.59	179.513	19.524	159.989
2	NBR/FA20	0.54	4.41	170.023	15.457	154.566
3	NBR/FA20	0.56	4.28	174.158	18.168	155.990

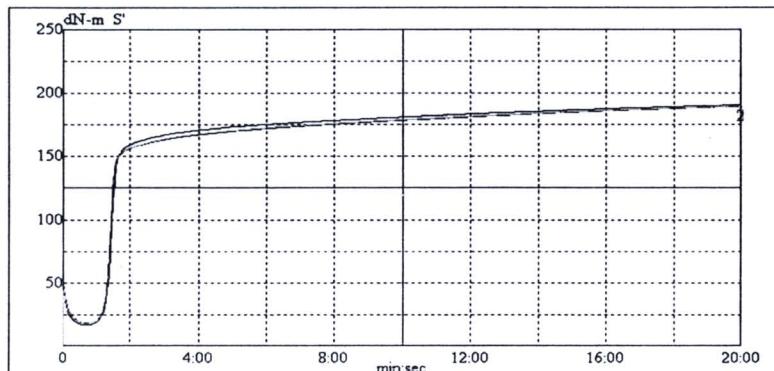
GOTECH



รูปที่ ข.21 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลันเตาที่ปริมาณ 20 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/FA30	0.56	5.13	190.360	16.473	173.887
2	NBR/FA30	0.56	6.23	189.072	18.033	171.039
3	NBR/FA30	0.56	6.06	189.411	17.829	171.582

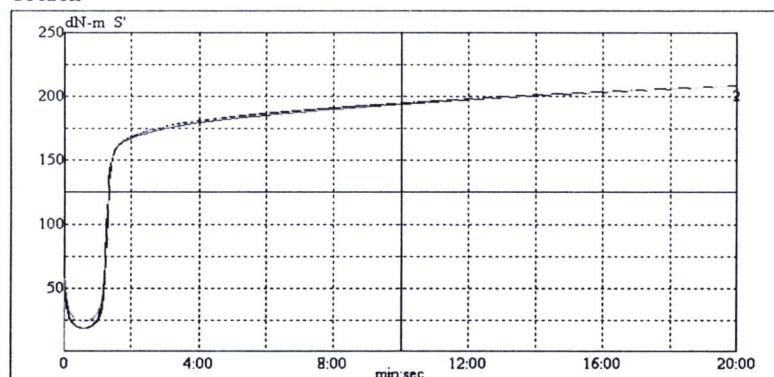
GOTECH



รูปที่ ข.22 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลอซที่ปริมาณ 30 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/FA 40	0.50	7.12	208.189	18.236	189.953
2	NBR/FA 40	0.47	7.45	207.783	18.575	189.208
3	NBR/FA 40	0.48	7.41	207.918	23.592	184.327

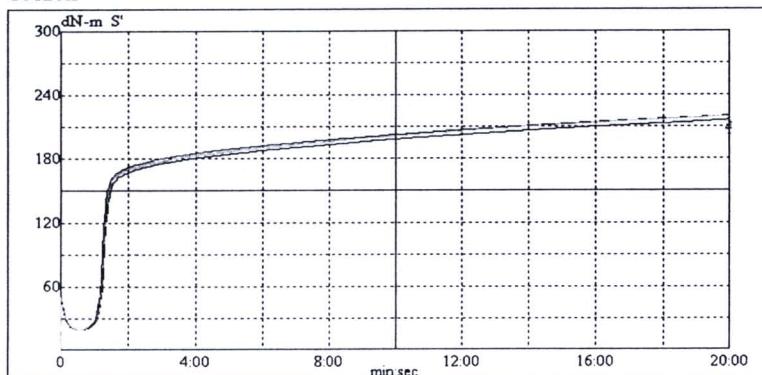
GOTECH



รูปที่ ข.23 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลอซที่ปริมาณ 40 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/FA 50	0.47	9.20	215.443	18.778	196.665
2	NBR/FA 50	0.45	9.04	219.714	18.914	200.800
3	NBR/FA 50	0.49	9.27	219.307	19.185	200.122

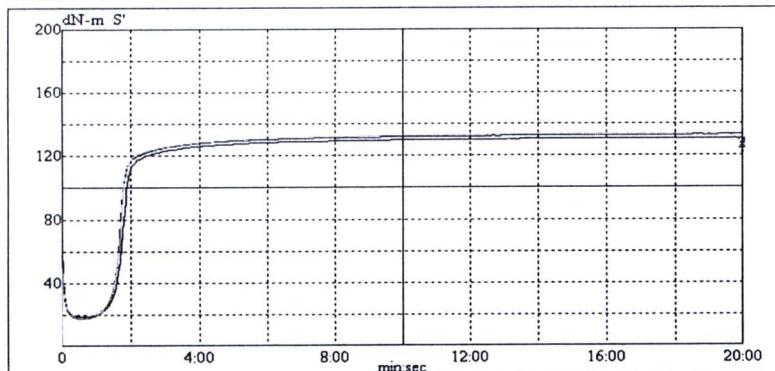
GOTECH



รูปที่ ข.24 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลันเตาที่ปริมาณ 50 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/SILITIN PF216 10	0.59	2.28	130.635	18.100	112.535
2	NBR/SILITIN PF216 10	0.55	2.23	132.601	16.880	115.721
3	NBR/SILITIN PF216 10	0.57	2.24	133.618	18.711	114.908

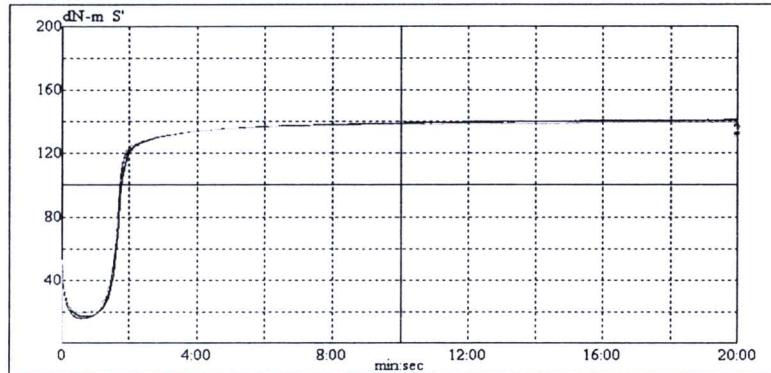
GOTECH



รูปที่ ข.25 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิตินเกรด PF216 ชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 10 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/SILITIN PF216 20	1.03	2.38	140.736	16.812	123.924
2	NBR/SILITIN PF216 20	0.54	2.31	140.194	15.592	124.602
3	NBR/SILITIN PF216 20	0.54	2.23	139.380	19.117	120.263

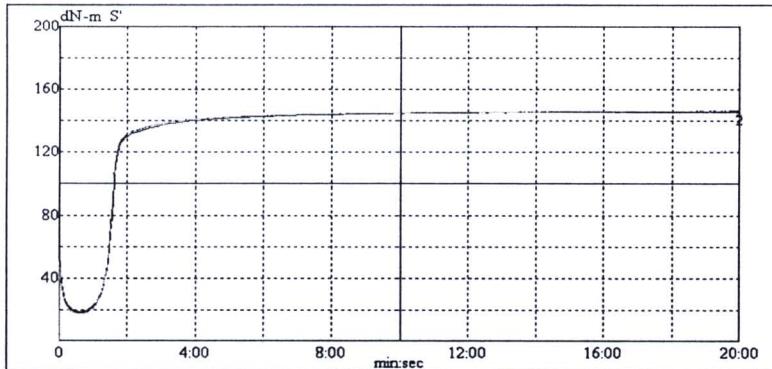
GOTECH



รูปที่ ข.26 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิตินเกรด PF216 ชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 20 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/SILITIN PF216 30	0.51	2.14	145.685	18.507	127.178
2	NBR/SILITIN PF216 30	0.54	2.24	146.092	17.762	128.330
3	NBR/SILITIN PF216 30	0.51	2.14	146.363	17.084	129.279

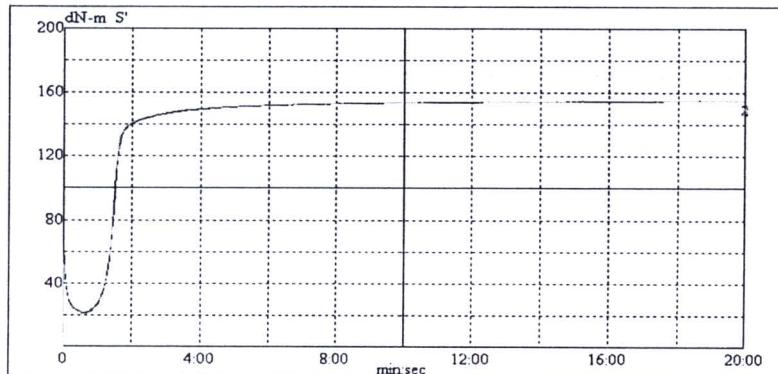
GOTECH



รูปที่ ข.27 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิตินเกรด PF216 ชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 30 phr

No.	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/SILITIN PF216 40	0.49	2:10	154.634	21.083	133.550
2	NBR/SILITIN PF216 40	0.54	2:16	154.973	21.558	133.415
3	NBR/SILITIN PF216 40	0.49	2:09	155.040	21.422	133.618

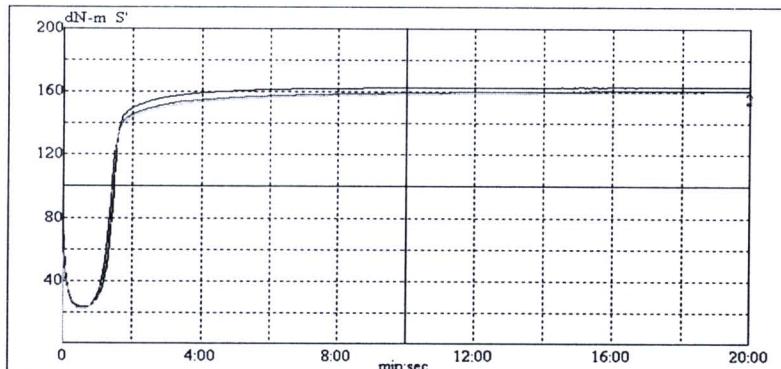
GOTECH



รูปที่ ข.28 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 ชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 40 phr

No	Compound	ts1 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/SILITIN PF216	0.50	2:01	162.837	23.185	139.652
2	NBR/SILITIN PF216	0.54	2:18	160.667	22.032	138.635
3	NBR/SILITIN PF216	0.46	2:18	159.583	22.100	137.482

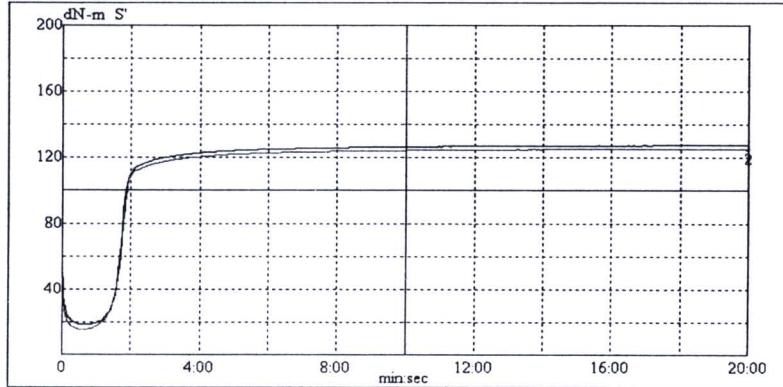
GOTECH



รูปที่ ข.29 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 ชนิดปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 50 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/Z86 10	0.59	1.06	2.24	127.110	18.168	108.942
2	NBR/Z86 10	0.56	1.03	2.26	124.873	15.253	109.620

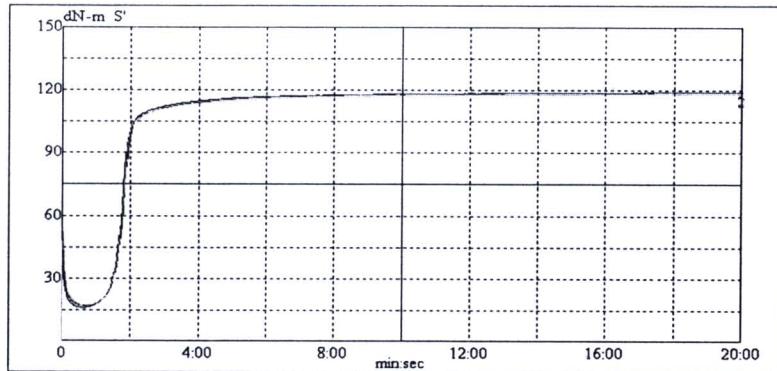
GOTECH



รูปที่ ข.30 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด Z86 ชนิดไม่ปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 10 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/Z86 20	1.04	1.09	2.24	118.772	16.745	102.027
2	NBR/Z86 20	1.00	1.05	2.35	118.840	15.863	102.976
3	NBR/Z86 20	1.02	1.11	2.31	117.958	16.948	101.010

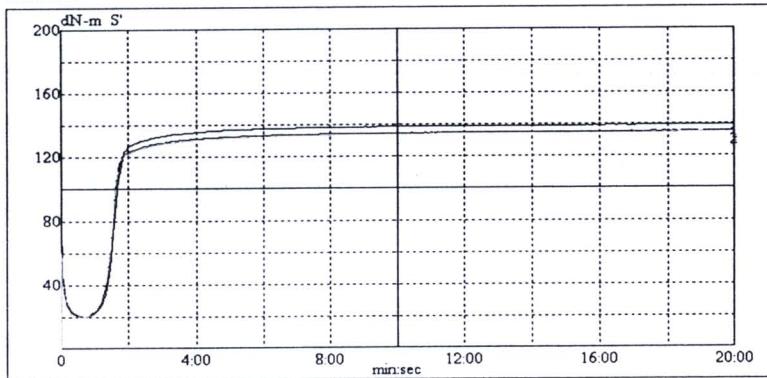
GOTECH



รูปที่ ข.31 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด Z86 ชนิดไม่ปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 20 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/Z86 30	0.59	1.09	2.14	138.906	19.931	118.975
2	NBR/Z86 30	0.54	0.59	2.10	135.177	19.795	115.382
3	NBR/Z86 30	0.53	1.03	2.09	134.567	19.795	114.772

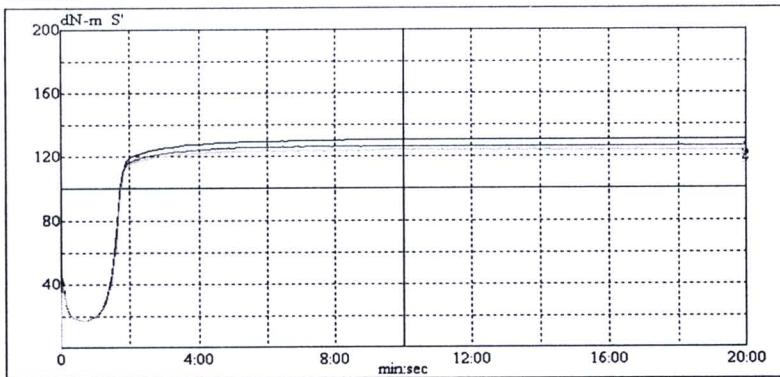
GOTECH



รูปที่ ข.32 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด Z86 ชนิดไม่ปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 30 phr

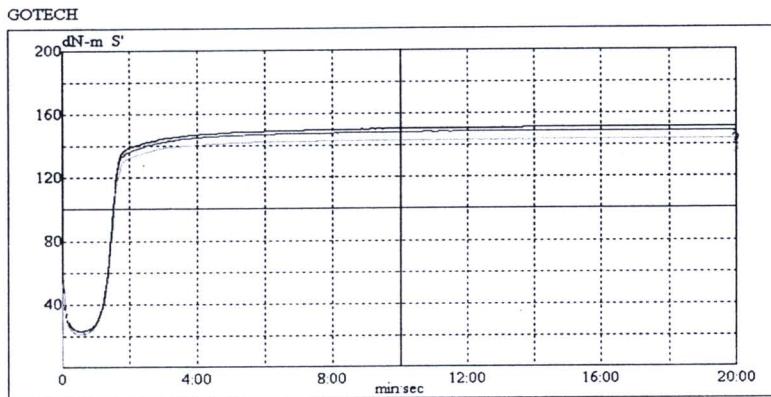
No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/Z86 40	1.00	1.00	2.05	130.568	17.016	113.552
2	NBR/Z86 40	0.55	0.60	1.60	126.297	17.016	109.281
3	NBR/Z86 40	0.55	0.60	1.58	124.127	17.151	106.976

GOTECH



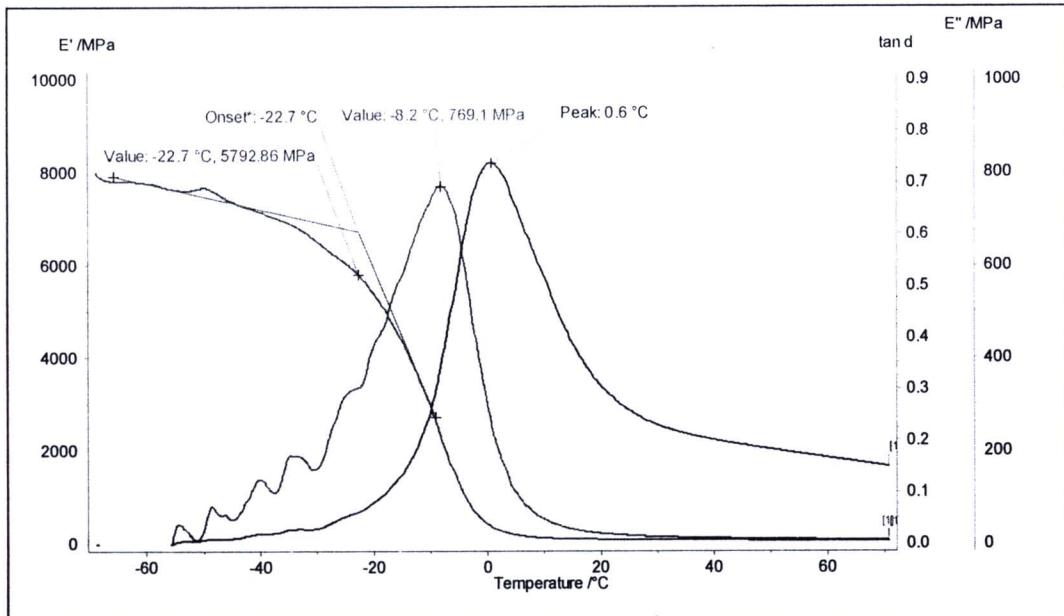
รูปที่ ข.33 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด Z86 ชนิดไม่ปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 40 phr

No.	Compound	ts1 m.s	ts2 m.s	tc90 m.s	MH dN-m	ML dN-m	DT(MH-ML) dN-m
1	NBR/Z86 50	0.52	0.57	1.60	151.041	22.846	128.195
2	NBR/Z86 50	0.48	0.53	2.05	148.668	21.016	127.652
3	NBR/Z86 50	0.54	0.54	1.57	143.584	20.948	122.636

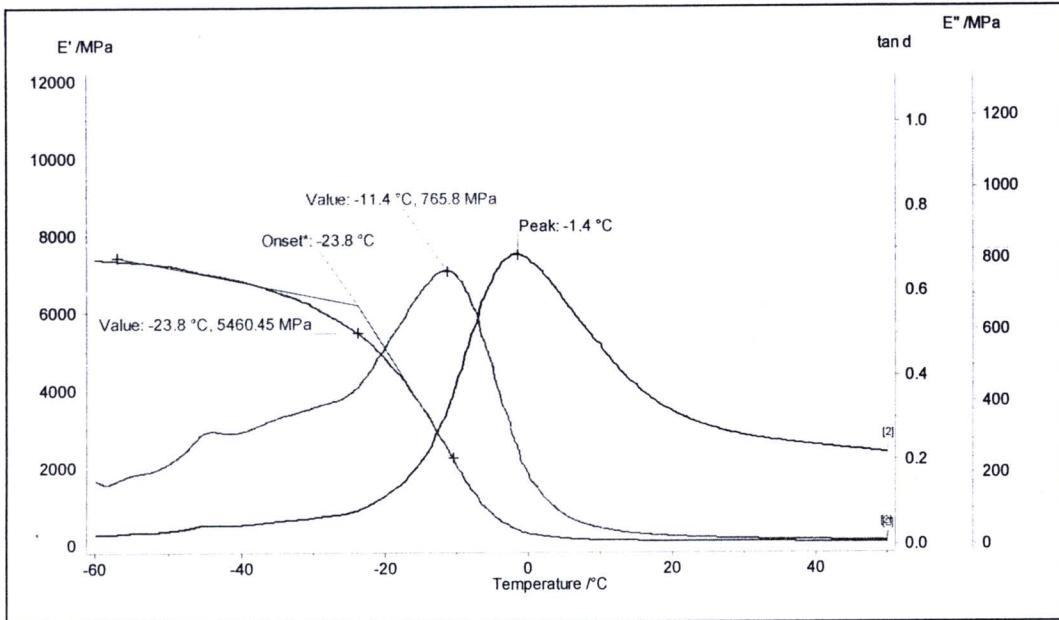


รูปที่ ข.34 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด Z86 ชนิดไม่ปรับปรุงผิวที่ปริมาณ 50 phr

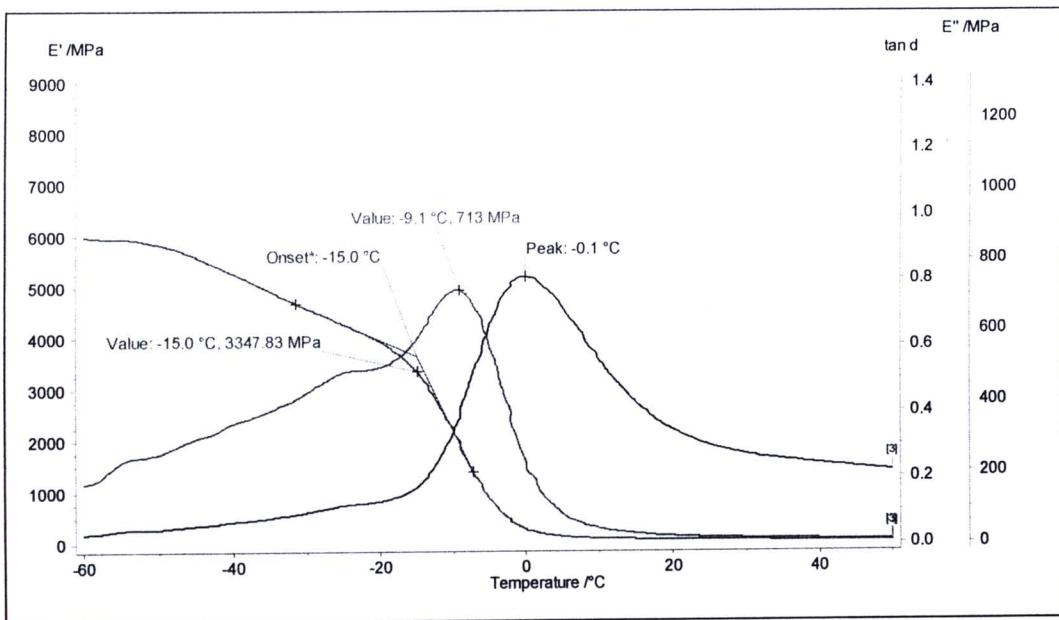
#### ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA



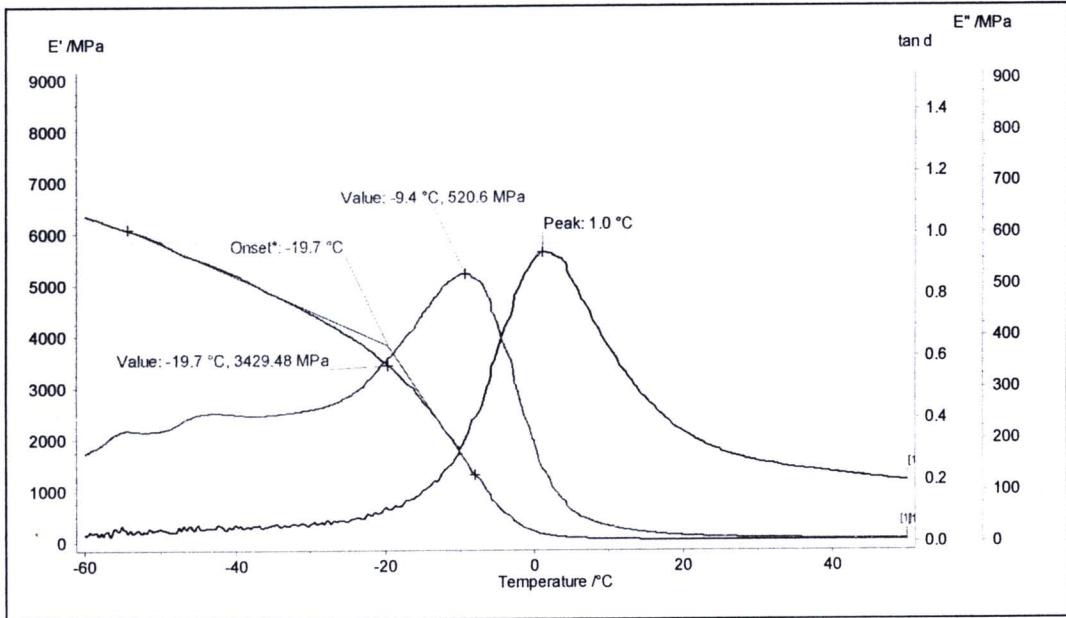
รูปที่ ข.35 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีรีซีพีเตดซิลิกา ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



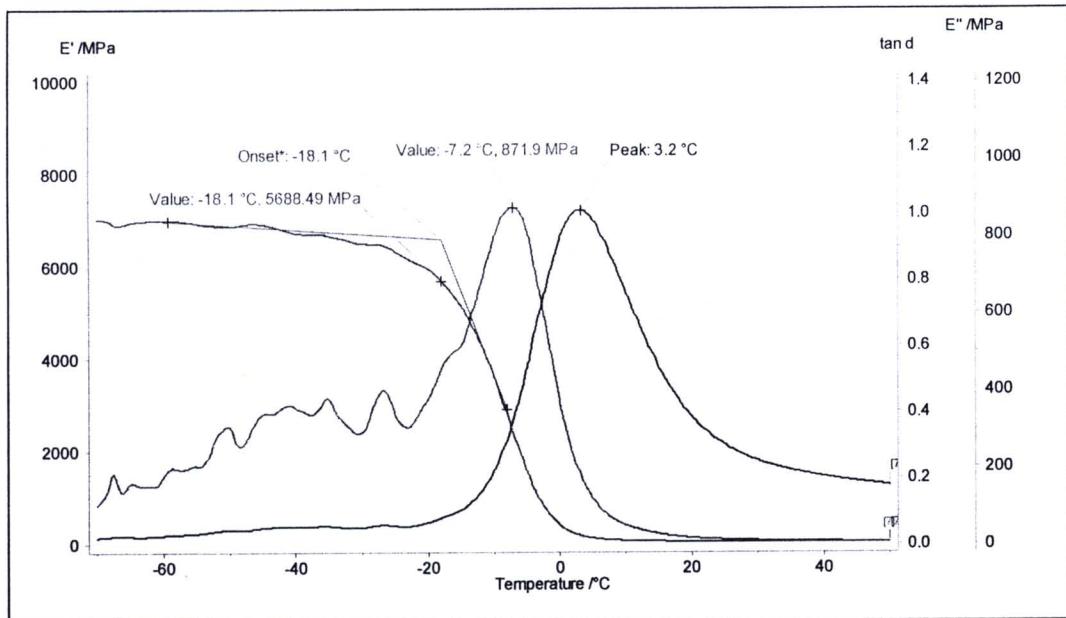
รูปที่ ข.36 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีรีซีพีเคตซีลิกา  
ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20 phr



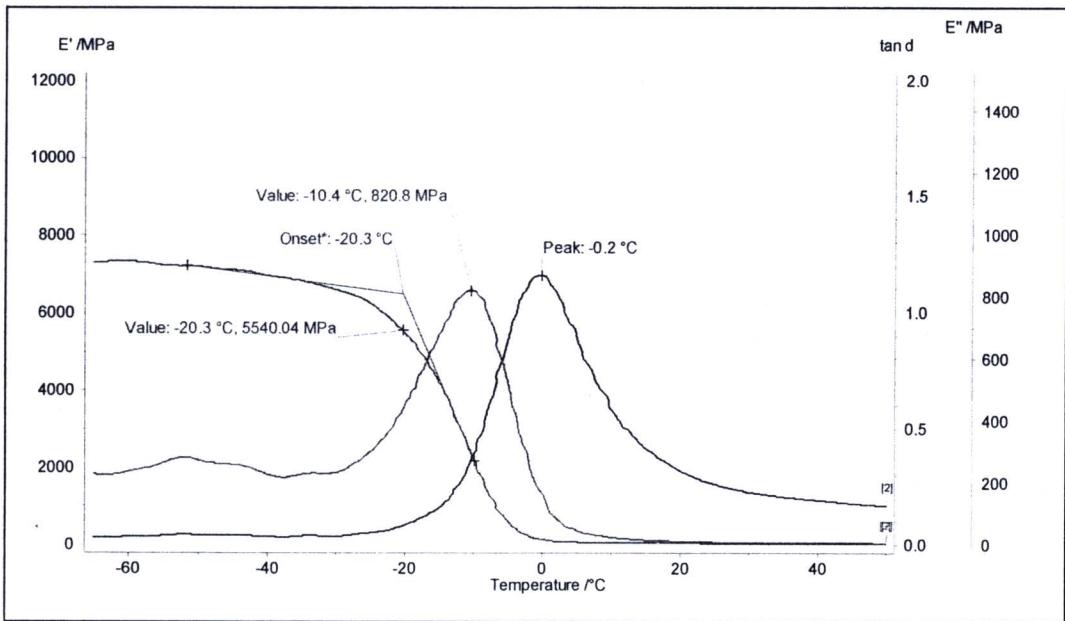
รูปที่ ข.37 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีรีซีพีเคตซีลิกา  
ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 30 phr



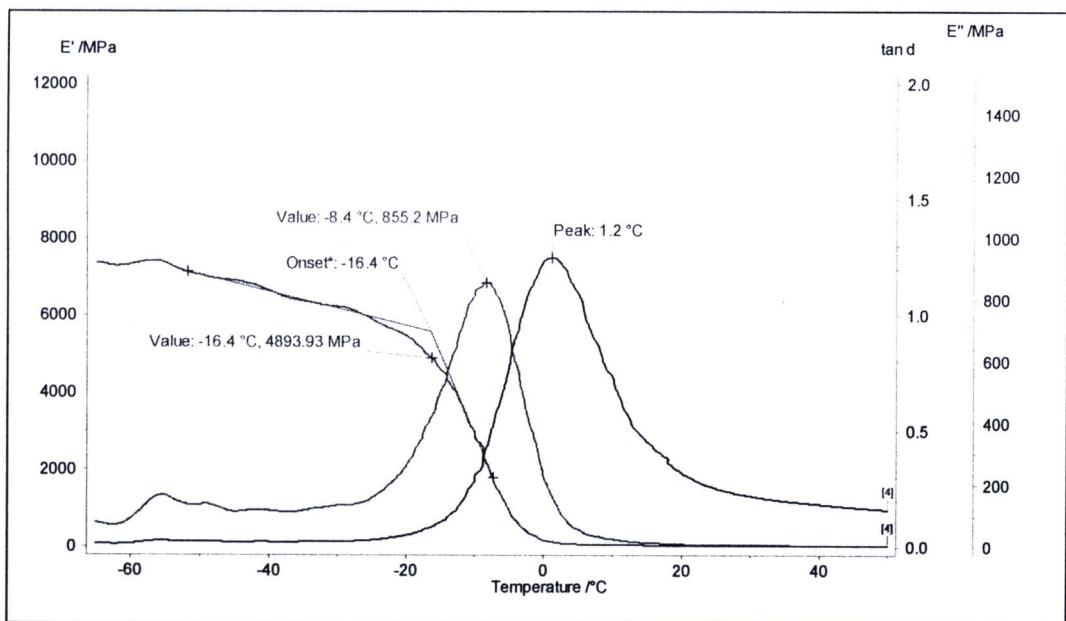
รูปที่ ข.38 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมพีริซีพิเตดซิลิกา ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 40 phr



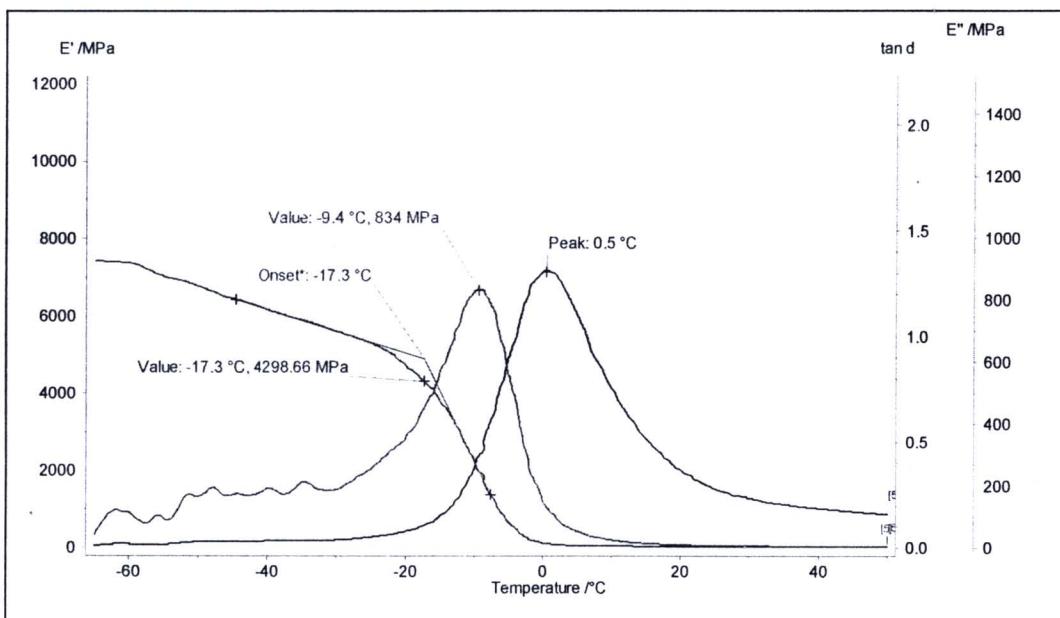
รูปที่ ข.39 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นปีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



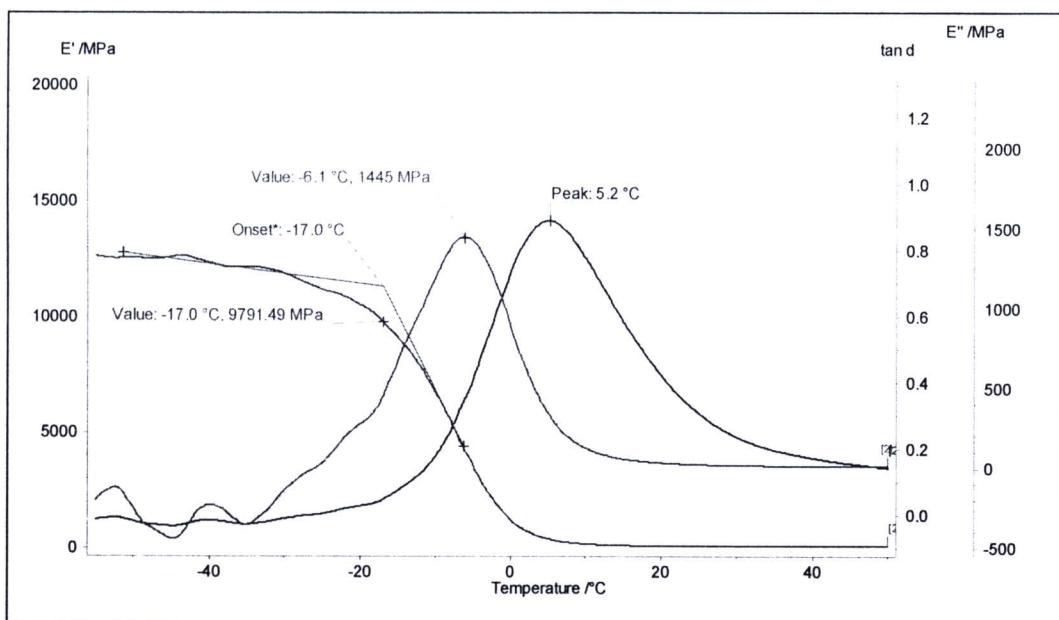
รูปที่ ข.40 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20 phr



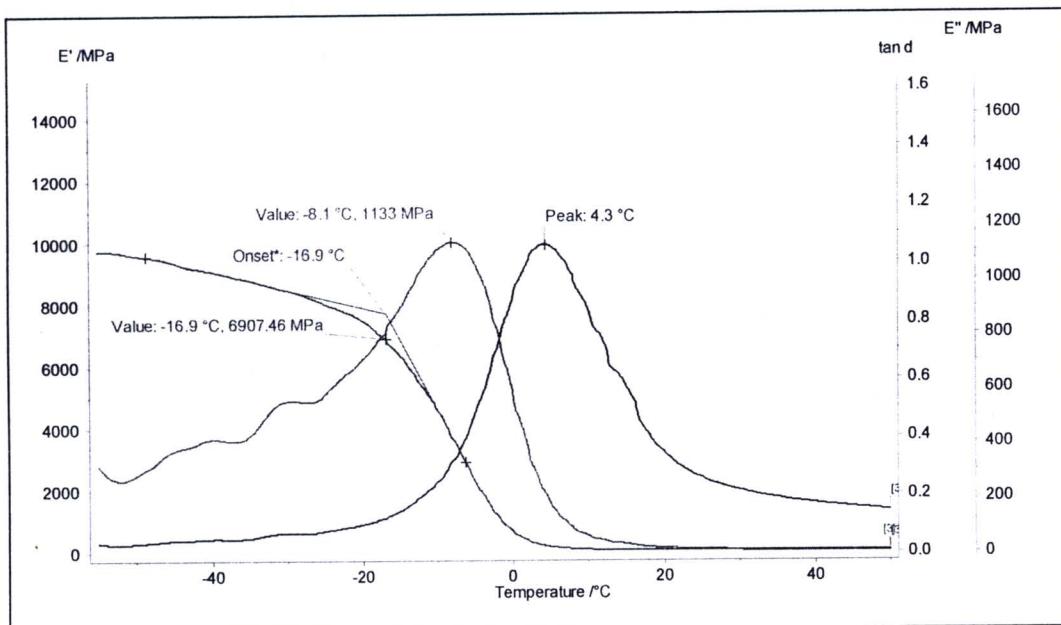
รูปที่ ข.41 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 30 phr



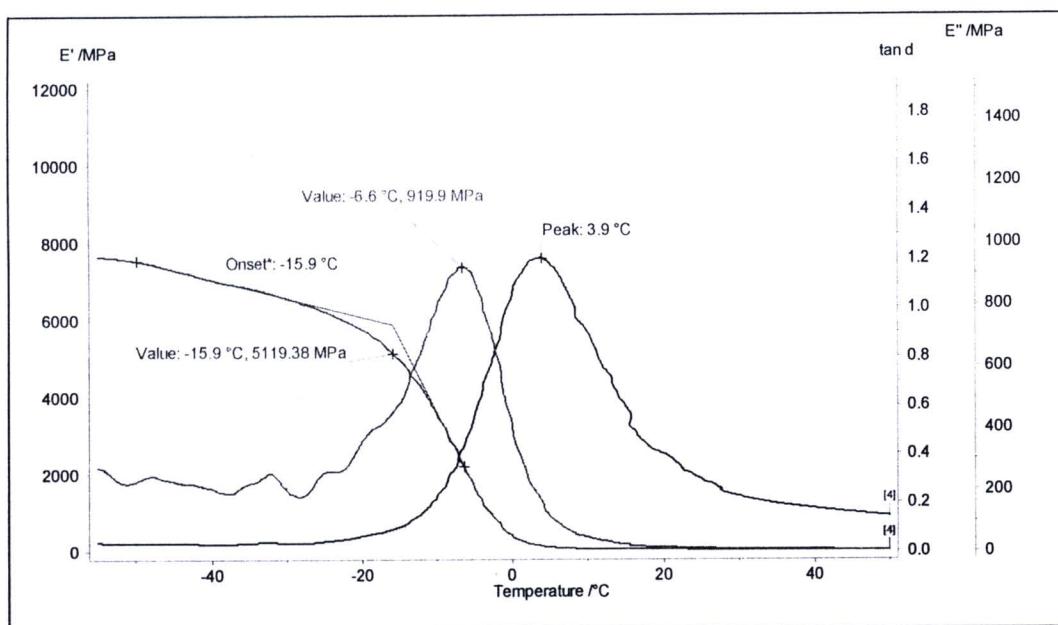
รูปที่ ข.42 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 40 phr



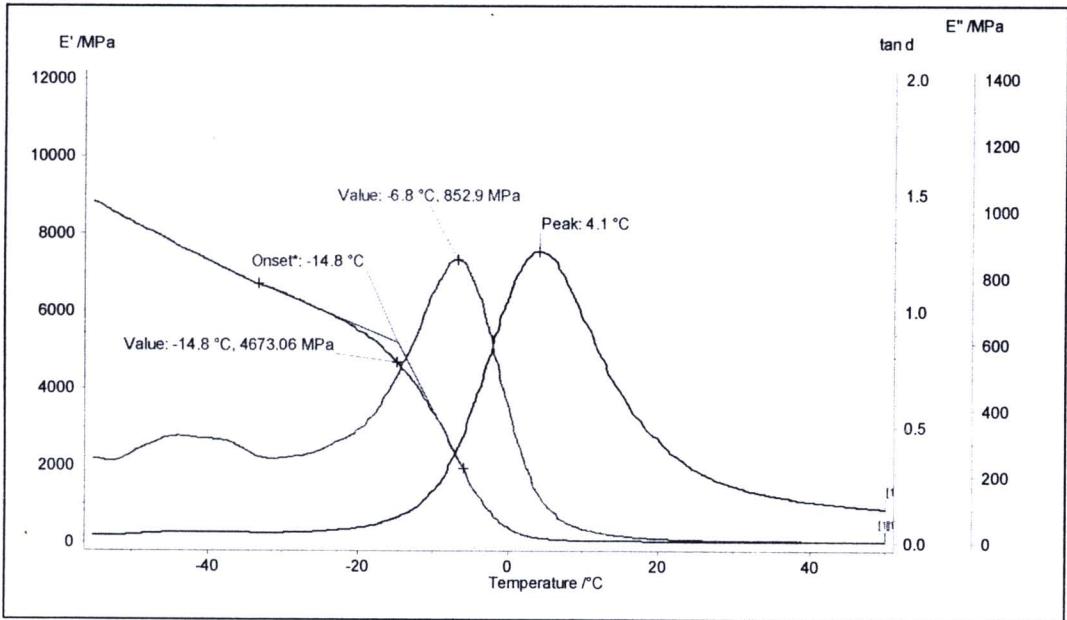
รูปที่ ข.43 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมแก้วลอยที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



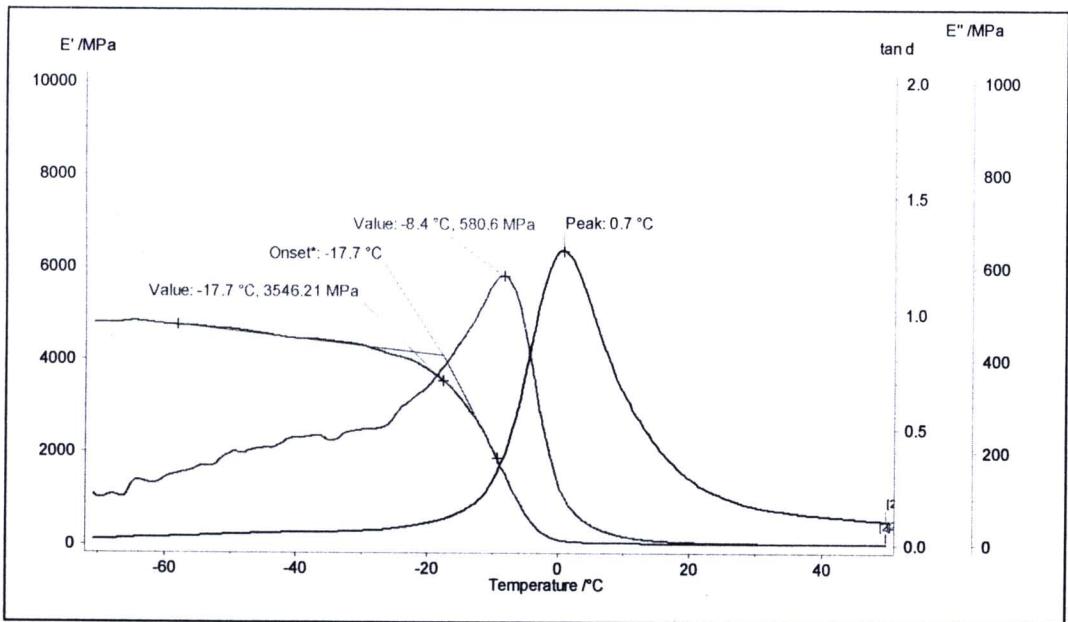
รูปที่ ข.44 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมถ่านลอยที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 20 phr



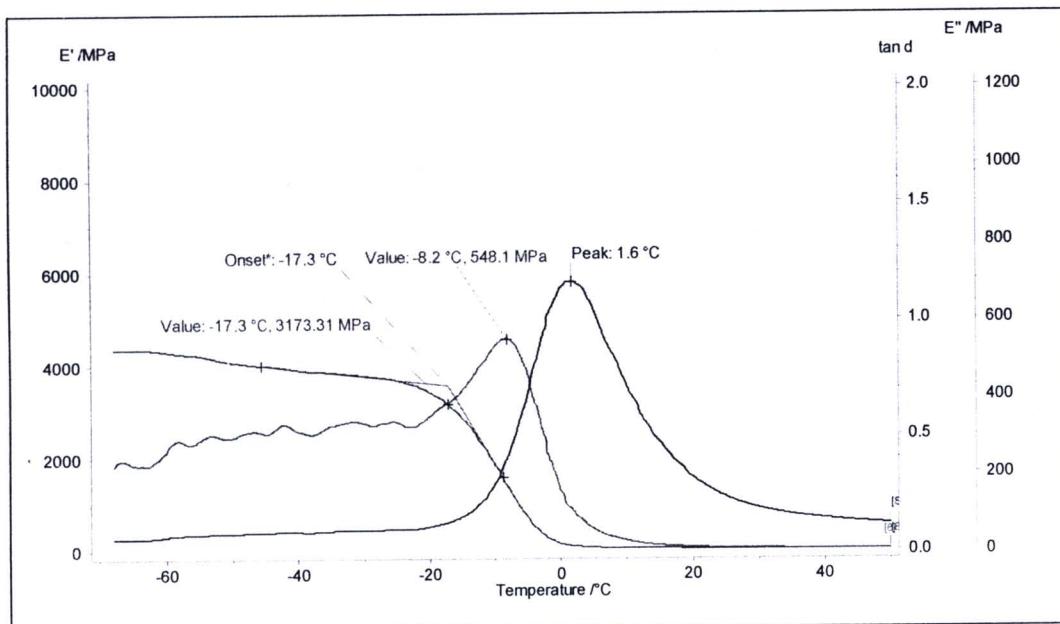
รูปที่ ข.45 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมถ่านลอยที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 30 phr



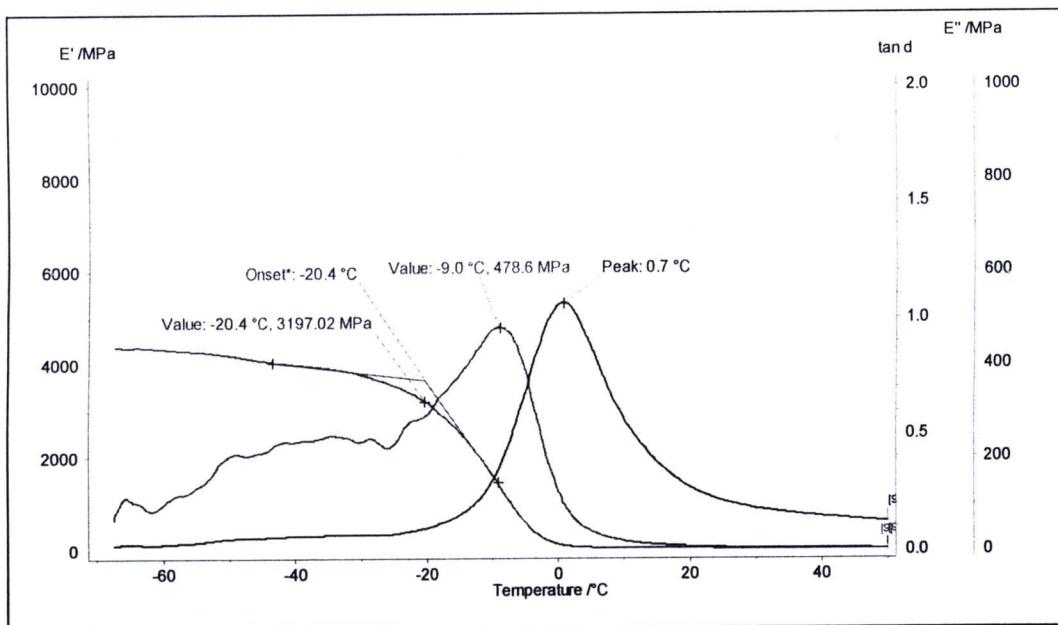
รูปที่ ข.46 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมถั่วลอ่ยที่ปริมาณ 50 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 40 phr



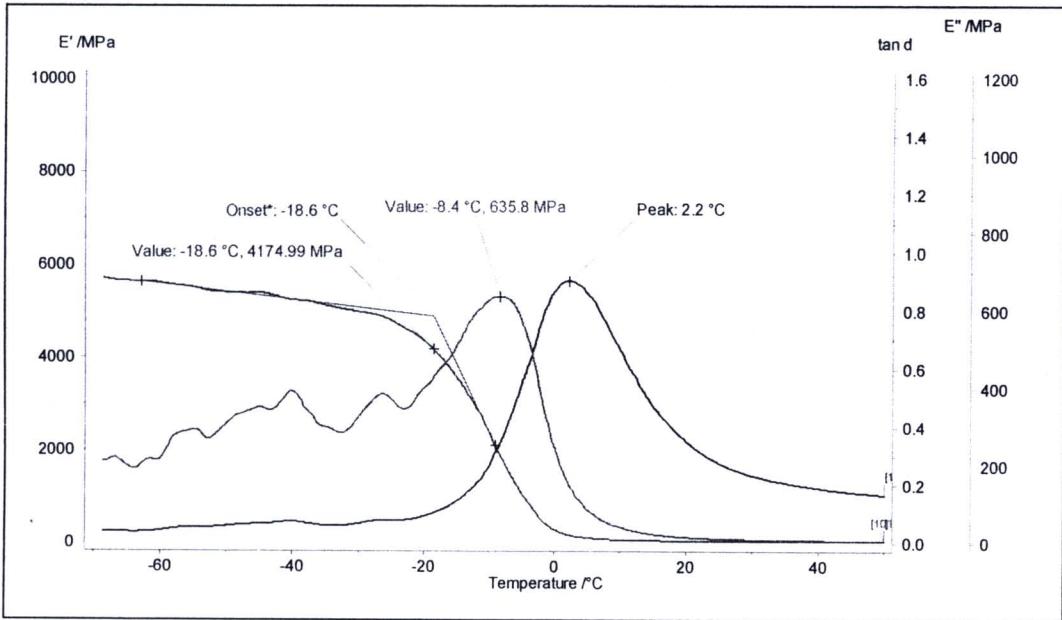
รูปที่ ข.47 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมกลุ่มซิลิกา และที่ปริมาณน้ำมันอะโรมาติก 10 phr



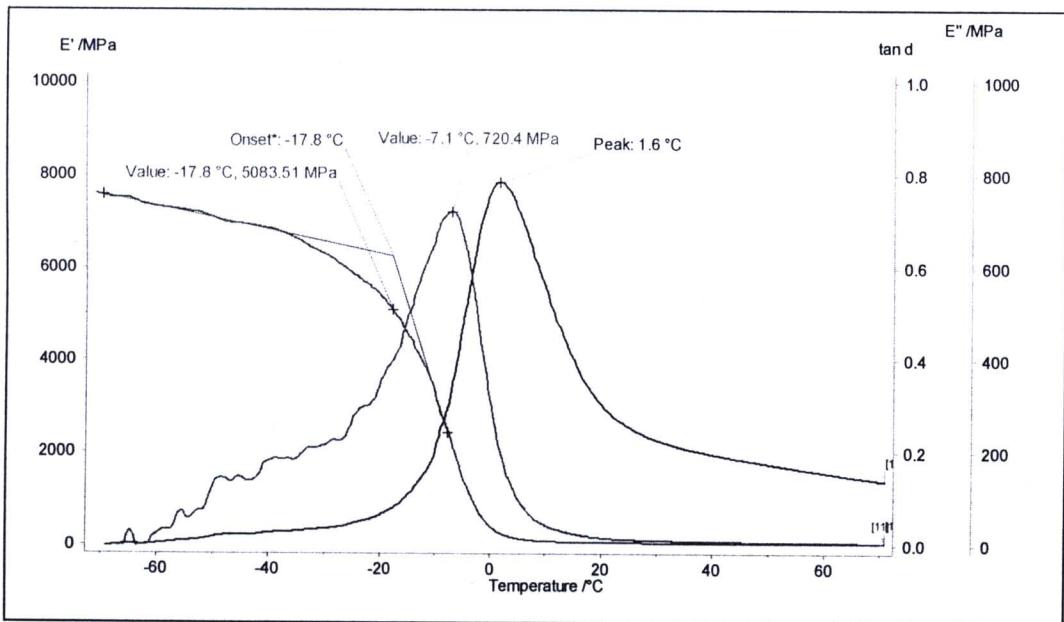
รูปที่ ข.48 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซีพีเตตซิลิกา ที่ปริมาณ 10 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



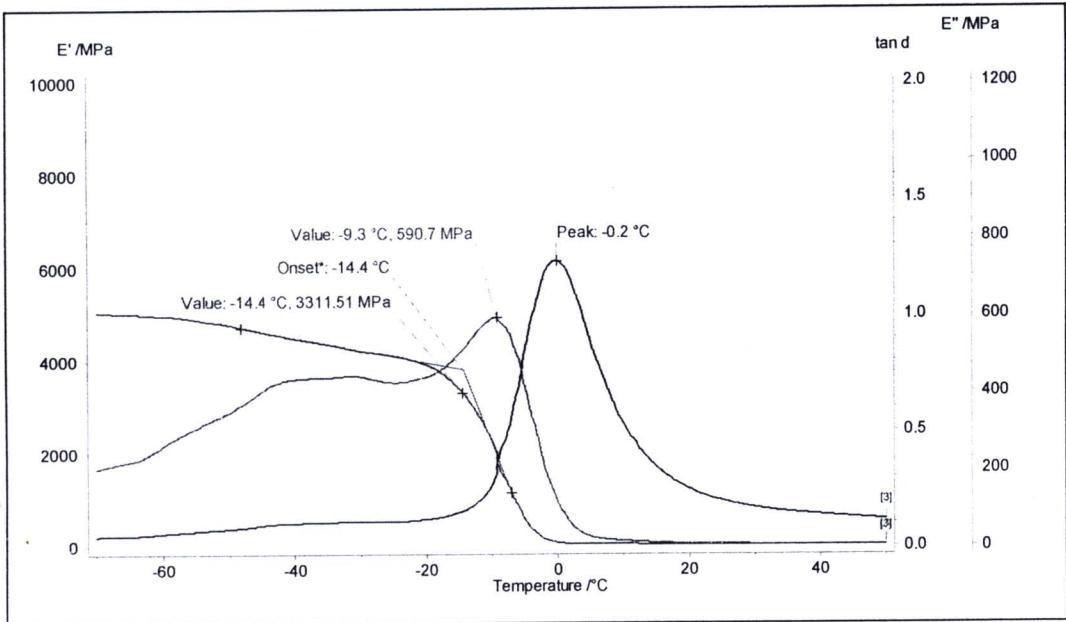
รูปที่ ข.49 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพรีซีพีเตตซิลิกา ที่ปริมาณ 20 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



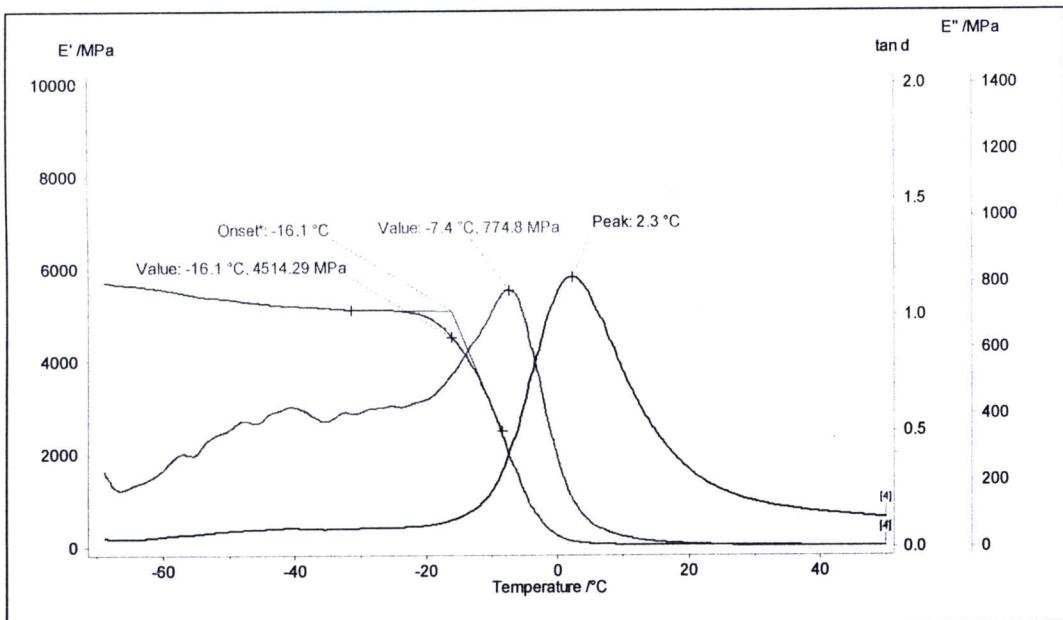
รูปที่ ข.50 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีริชปีเตดซิลิกาที่ ปริมาณ 30 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



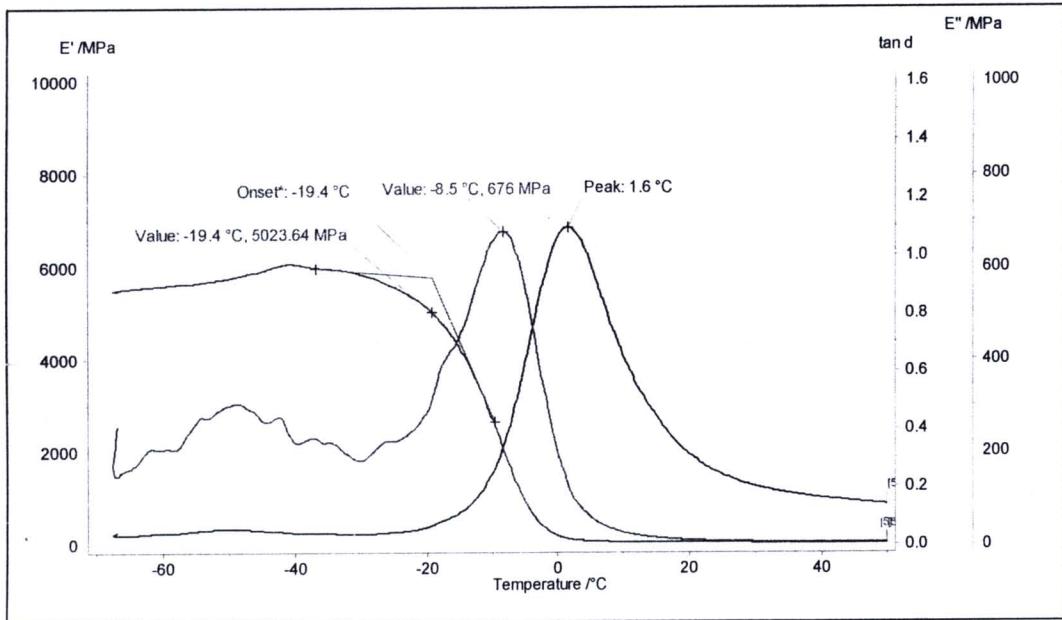
รูปที่ ข.51 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมพีริชปีเตดซิลิกา ที่ปริมาณ 40 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



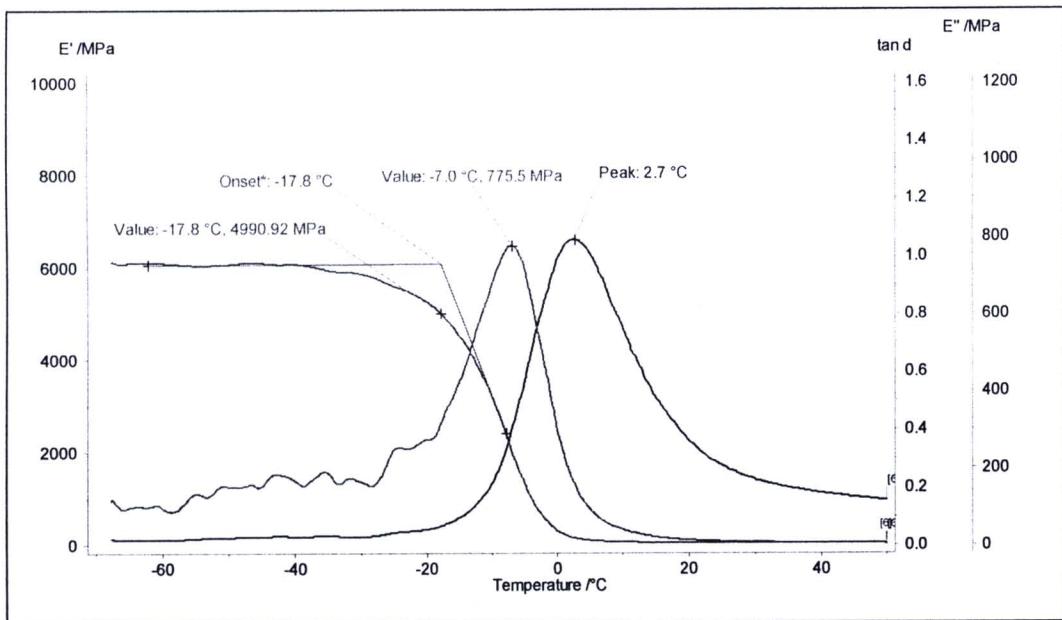
รูปที่ ข.52 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมชนิดคาร์บอนแบล็ค PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 10 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ข.53 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมชนิดคาร์บอนแบล็ค PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 20 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ข.54 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 30 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr



รูปที่ ข.55 ผลการทดสอบด้วยเครื่อง DMA ของยางเอ็นบีอาร์ผสมสารตัวเติมซิลิโคนเกรด PF216 (ชนิดปรับปรุงผิว) ที่ปริมาณ 40 phr และน้ำมันอะโรมาติกที่ปริมาณ 10 phr

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวปิยะภรณ์ นิลทุย
วัน เดือน ปีเกิด	23 ตุลาคม 2529
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพิบูลวิทยาลัย จังหวัดลพบุรี พ.ศ. 2547
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2551
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2554
ทุนวิจัย	ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว. – อุตสาหกรรม พ.ศ. 2552 สัญญาเลขที่ MRG-WI525S074
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	Niltui, P., Wimolmala, E., and Sombatsompop, N., 2011, “Dynamic Mechanical Thermal Properties and Elastic Recovery of Silica Fillers Compound in NBR”, <b>The 2<sup>nd</sup> National Academic Congress of Rajabhat University</b> , 14-17 <sup>th</sup> January 2011, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 26 สิงหาคม 2554

ข้าพเจ้า นางสาวปิยะภรณ์ นิลทุ้ย

รหัสประจำตัว 52401012

เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา โท เอก ปร.ด

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

อยู่บ้านเลขที่ 129/1 ..... ตรอก/ซอย..... ถนน.....

ตำบล/แขวง หิมาปุณ ..... อำเภอ/เขต หนองปรือ ..... จังหวัด อยุธยา

รหัสไปรษณีย์ 3240 ..... ขอโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-

พระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี ดร. พัฒนะ รักความสุข ตำแหน่ง คณบดีคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลง ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง “สมบัติความร้อนเชิงกลพลวัต พฤติกรรมการคืนกลับตัวทางฮิสเทติก และความคงทนของยางเอ็นบีอาร์ที่มีสารเสริมแรงกลุ่มซิลิกาสำหรับงานในระบบไฮดรอลิก”

ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28 และมาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ได้ทุนจากโครงการวิจัย สกว.-อุตสาหกรรม

ลงชื่อ ปิยะภรณ์ นิลทุ้ย ผู้โอนลิขสิทธิ์

(นางสาวปิยะภรณ์ นิลทุ้ย)

ลงชื่อ ..... ผู้รับโอนลิขสิทธิ์

(ดร. พัฒนะ รักความสุข)

ลงชื่อ ..... พยาน

(ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

ลงชื่อ ..... พยาน

(.....)

