



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>**ผลของการเติมเถ้าไพโรไลซิสที่ปรับสภาพผิวต่อความต้านทานการนำไฟฟ้าของฟิล์มยาง****Effect of filling surface-treated pyrolytic char on resistivity of rubber films**ภัทราภรณ์ แย้มขยาย¹⁾ ดวงกมล ด่านวานิชกุล²⁾ และ ภาณุ ด่านวานิชกุล^{*1)}Pattraporn Yamkaya¹⁾, Duangkamol Danwanichakul²⁾ and Panu Danwanichakul^{*1)}¹⁾ สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
จังหวัดปทุมธานี 12120Energy and Environmental Technology Management, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, Pathumthani, 12120, Thailand.²⁾ หน่วยวิจัยเฉพาะทางด้านยางธรรมชาติ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี 12120
Center of Excellence on Natural Rubber Technology, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, Pathumthani, 12120, Thailand.

Received March 2014

Accepted May 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มยางธรรมชาติที่ผสมด้วยเถ้าไพโรไลซิสจากยางรถยนต์ใช้แล้วเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ผสมด้วยเขม่าดำชนิด N234 และ N330 ในปริมาณการเติมต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 ของน้ำหนักยางแห้ง ทั้งในสภาวะที่ใช้และไม่ใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักต่อปริมาตร โดยเถ้าและเขม่าดำจะถูกปรับสภาพผิวให้ชอบน้ำด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์และสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับก่อนที่จะผสมในน้ำยางธรรมชาติและขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มยางที่ผสมเถ้าไพโรไลซิสมีความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อเติมเถ้าเพิ่มขึ้น และพบว่า SDS ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของเถ้าไพโรไลซิสและเขม่าดำได้ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มที่เติมสารลดแรงตึงผิวลดลง นอกจากนี้เมื่อทดสอบการดูดซับไธระเหยของเฮกเซน พบว่าในช่วง 30 วินาทีแรก การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของยางที่ผสมด้วยเขม่าดำไม่ชัดเจนเท่ากับยางที่ผสมเถ้าไพโรไลซิส ส่วนที่สภาวะเติมสารลดแรงตึงผิวพบว่าความต้านทานของฟิล์มยางที่เติม N330 และเถ้าไพโรไลซิสระหว่างการดูดซับไธระเหยเฮกเซนเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ เถ้าไพโรไลซิส เขม่าดำ สารระเหย เฮกเซน**Abstract**

In this research, natural rubber (NR) films filled with pyrolytic tire char, carbon black N234 and N330 were compared for their electrical resistivity. The filler loading was varied to be 5, 10, 15, 20 and 25% of dry rubber content. The effect of surfactant which is 2 %w/v sodium dodecyl sulfate (SDS) was also investigated. In the experiments, it was necessary to disperse the pyrolytic char in ethyl alcohol while disperse carbon black (CB) in ammonium hydroxide solution prior to mixing with the rubber latex and the filled NR film was prepared by

* Corresponding author. Tel.: +66 (0) 2564 3001 ; fax: +66 (0) 2564 3024

Email address: amiline_cute@hotmail.com (Yamkaya, P.), duangkamol@hotmail.com (Danwanichakul, D.), dpanu@engr.tu.ac.th* (Danwanichakul, P.)

doi: 10.14456/kkuenj.2015.4

casting the mixture on a plate. It was found that increasing the amount of pyrolytic char in the NR film could lower its resistivity. The surfactant, SDS, could help better dispersion of both CB and pyrolytic char, thereby decreasing the resistivity. In a separate experiment where hexane vapor was absorbed in NR film without surfactant, in the first 30 seconds, the rate of increasing resistivity of the CB-filled film was not seen as clearly as that of pyrolytic-char-filled film. For the films with surfactant, the slow increase in resistivity of the NR films filled with N330 and pyrolytic char during adsorbing hexane vapor was observed.

Keywords : Natural rubber, Pyrolytic char, Carbon black, Volatile organic matter, Sensor

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์เติบโตอย่างรวดเร็ว จึงมีปัญหาดังกล่าวคือ ปริมาณยางรถยนต์ใช้แล้วเพิ่มจำนวนสูงขึ้นตามไปด้วย วิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการกำจัดและสร้างมูลค่าให้แก่ขยะยางรถยนต์ใช้แล้วคือ การไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ได้แก่ น้ำมันและแก๊ส ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้ ที่เหลืออีกส่วนหนึ่งคือของแข็งหรือถ่านไพโรไลซิสซึ่งยากแก่การนำไปกำจัด ถ่านนี้มีองค์ประกอบของเขม่าดำหรือคาร์บอนแบล็คอยู่ในปริมาณสูง [1] จึงจะนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่ใช้เขม่าดำเป็นองค์ประกอบได้ หนึ่งในนั้นก็คือการนำไปผสมเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าหรืออุปกรณ์เซนเซอร์ มีตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการผสมเขม่าดำในพอลิเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติ [2] ซิลิโคน [3] สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดทับ โดยพบว่าปริมาณผงเขม่าดำที่ถูกผสมและแรงกดทับมีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ นอกจากนี้ การศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดทับแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดไอรระเหยของสารอินทรีย์อีกด้วย

หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัดไอรระเหยนั้นคือการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในขณะดูดซับหรือดูดซึมสาร หากพอลิเมอร์ที่ใช้นั้นมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ก็จำเป็นต้องเติมผงเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ลงในพอลิเมอร์ การนำไฟฟ้าของเขม่าดำนั้นขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะ ความบริสุทธิ์ของเขม่าดำ และเคมีบนพื้นผิวของเขม่าดำ [4] นอกจากนี้ยังขึ้นกับการกระจายตัวของอนุภาคเมื่อถูกเติมในพอลิเมอร์อีกด้วย การอธิบายการเติมอนุภาคนำไฟฟ้าได้ให้กระจายอยู่ในแมทริกซ์ของพอลิเมอร์นั้นอาศัยหลักการ

ของ percolation ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงของกลุ่มอนุภาคทั่วทั้งโครงสร้างของ พอลิเมอร์ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างในสองมิติอย่างฟิล์มบาง หรือโครงสร้างในสามมิติทั่วไป การนำไฟฟ้าของคอมพอสิตลักษณะนี้จะเป็นหรือไม่ขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องของการเชื่อมโยงดังกล่าว ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคที่เติมลงไป การกระจายตัวของอนุภาคขนาดของอนุภาค และค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาค [5] เมื่อมีการดูดซับไอรระเหยของสารที่นำไฟฟ้าได้จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ผสมเขม่าดำมีค่าเพิ่มขึ้นอีก [6] นอกจากนี้เมื่อปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคผงเขม่าดำ โดยการทำให้ผิวของผงเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชัน $-COO^-$ จะช่วยให้อนุภาคกระจายตัวในสารแขวนลอยได้ดี และสามารถคงสภาพการกระจายตัวได้นาน การปรับปรุงการกระจายตัวของผงเขม่าดำด้วยวิธีนี้ ส่งผลให้พบปริมาณอนุภาคเขม่าดำในเส้นใยนาโนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากขึ้น จึงทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลง [7]

ที่ผ่านมาในงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เขม่าดำผสมเข้ากับยางธรรมชาติและพอลิเมอร์หลายชนิดเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดไอรระเหย ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของถ่านไพโรไลซิสยางล้อรถยนต์โดยนำมาผสมในยางธรรมชาติซึ่งยังไม่มีการศึกษา มาก่อน ถึงแม้ว่าจะเป็นที่ยอมรับกันว่าถ่าน ไพโรไลซิสมีค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี แต่ยังไม่มีความชัดเจนว่าเมื่อผสมเข้าไปในพอลิเมอร์แล้วจะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วงใด ซึ่งอาจจะใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นก็ได้ และอีกประการหนึ่งคือการใช้ประโยชน์ในลักษณะที่เป็นเซนเซอร์นั้นจะมีการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานซึ่งคิดเทียบเคียงกับค่าความต้านทานเริ่มต้น ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษาเปรียบเทียบสมบัติ

ดังกล่าวกับผงเขม่าดำ นอกจากนี้ยังจะศึกษาการปรับปรุงให้เจ้าสามารถกระจายตัวได้ดีโดยใช้สารลดแรงตึงผิว ซึ่งน่าจะส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าของเจ้าดีขึ้น รวมถึงการศึกษาผลของการใช้ปริมาณของเจ้าเปรียบเทียบกับผงเขม่าดำต่อการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติและเนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารไม่มีขั้ว จึงมีความน่าจะเป็นในการนำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสารระเหยไม่มีขั้ว โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไอระเหยเอกเซน

2. วิธีการการวิจัย

2.1 สารเคมีที่ใช้

น้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูงที่มีปริมาณยางแห้ง (Dry rubber content หรือ DRC) เท่ากับ 60% ได้รับความอนุเคราะห์จากองค์การสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ผงเขม่าดำชนิด N234 จากบริษัท Thai Tokai Carbon Product ผงเขม่าดำชนิด N330 จากบริษัท Thai Carbon Black เอทิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 100 %w/w แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ความเข้มข้น 28-30 %w/w จากบริษัท J.T. Baker และ Sodium dodecyl sulfate (SDS) จากบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. ส่วน n-Hexane ที่เข้มข้น 99 %w/w นั้นมาจากบริษัท Merck

2.2 การปรับสภาพผิวเขม่าดำ

นำเขม่าดำผสมกับสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 %w/w ปริมาตร 35.7 มิลลิลิตร กวนในเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 15 นาที ตามระเบียบวิธีวิจัยของ Job และคณะ [2] สำหรับการศึกษาผลการเติมสารลดแรงตึงผิวนั้น จะเติมสารละลาย SDS ที่ความเข้มข้น 2 %w/v ปริมาตร 5.7 มิลลิลิตร ลงในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 2 %w/w ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที

2.3 การปรับสภาพผิวเจ้าไฟโรไลซิส

นำเจ้าไฟโรไลซิสกวนรวมกับสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 60 %w/w ปริมาตร 35.7 มิลลิลิตร ในเครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็กเป็นเวลา 15 นาที สำหรับการศึกษาผลการเติมสารลดแรงตึง

ผิวนั้นจะเติมสารละลาย SDS ความเข้มข้น 2 %w/v ปริมาตร 5.7 มิลลิลิตร ลงในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 60 %w/w ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที

2.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มยางที่เติมเขม่าดำและเจ้าไฟโรไลซิส

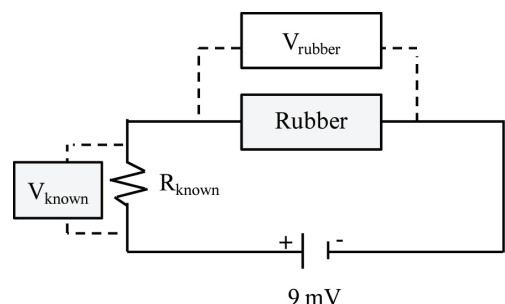
เทสารแขวนลอยของเขม่าดำหรือเจ้าไฟโรไลซิสที่เตรียมได้ในข้อ 2.2 หรือ 2.3 ลงในน้ำยางที่มีปริมาณเนื้อยางเข้มข้น 40 %w/w ปริมาตร 14.3 มิลลิลิตร กวนผสมกันเป็นเวลา 10 นาที ด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นเทของผสมลงในจานแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ลอกฟิล์มออกจากจานแก้ว แล้วจึงนำยางไปทดสอบความต้านทานไฟฟ้าก่อนและในขณะดูดซับไอระเหยของเอกเซน ปรับเปลี่ยนปริมาณเจ้าซึ่งเป็นสารตัวเติมเพื่อให้ได้ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักยางแห้ง

2.5 การทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์

ทดสอบลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ของเขม่าดำ เจ้าไฟโรไลซิส และผิวของฟิล์มยาง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (Hitachi, S-3400N)

2.6 การทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มยาง

แผ่นฟิล์มยางขนาด 2×2 เซนติเมตรถูกนำมาวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยใช้ดีจิจิตอลมิเตอร์ ผ่านวงจรอนุกรมดังรูปที่ 1 โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มคำนวณจากสมการที่ 1 ค่าที่รายงานได้จากการวัดซ้ำ 5 ครั้ง



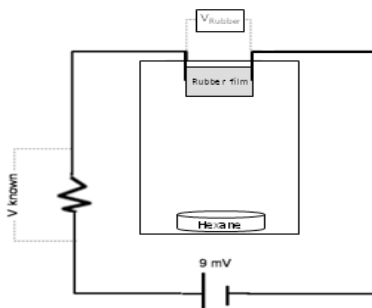
รูปที่ 1 วงจรอนุกรมเพื่อตรวจวัดค่าความต้านทาน

$$R_{rubber} = \frac{V_{rubber}}{V_{known}} \times R_{known} \quad (1)$$

เมื่อ R_{rubber} คือความต้านทานของฟิล์มยาง R_{known} คือความต้านทานของตัวที่ทราบค่าที่ต่อกับระบบ V_{known} คือค่าความต่างศักย์ที่วัดคร่อมตัวต้านทานที่ทราบค่า และ V_{rubber} คือค่าความต่างศักย์ที่วัดคร่อมฟิล์มยาง

2.7 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อนำไปดูดซับไอระเหยของเฮกเซน

นำแผ่นฟิล์มขนาด 2x2 เซนติเมตรมาดูดซับไอระเหยของเฮกเซน ที่ความเข้มข้นในอากาศเท่ากับ 0.306 mol/l วัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มขณะดูดซับไอระเหยของเฮกเซนด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 5 นาที ค่าที่รายงานได้จากการวัดซ้ำ 5 ครั้ง

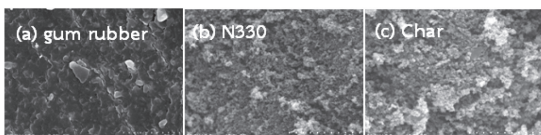


รูปที่ 2 การดูดซับไอระเหยของฟิล์มยาง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ลักษณะพื้นฐานวิทยา

รูปที่ 3 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของฟิล์มยางที่ไม่เติมสารตัวเติม ผงเขม่าและถ่าน จะสังเกตได้ว่าถ่านไฟโรไลซิส มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าผงเขม่าดำ N330



รูปที่ 3 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของ (a) ฟิล์มยางที่ไม่เติมสารตัวเติม (b) เขม่าดำชนิด N330 และ (c) ถ่านไฟโรไลซิส

ส่วนรูปที่ 4 นั้นแสดงการกระจายตัวของสารตัวเติมในฟิล์มยาง โดยเปรียบเทียบระหว่างการเติมเขม่าดำชนิด N330 หลังจากปรับสภาพผิวด้วยแอมโมเนียม

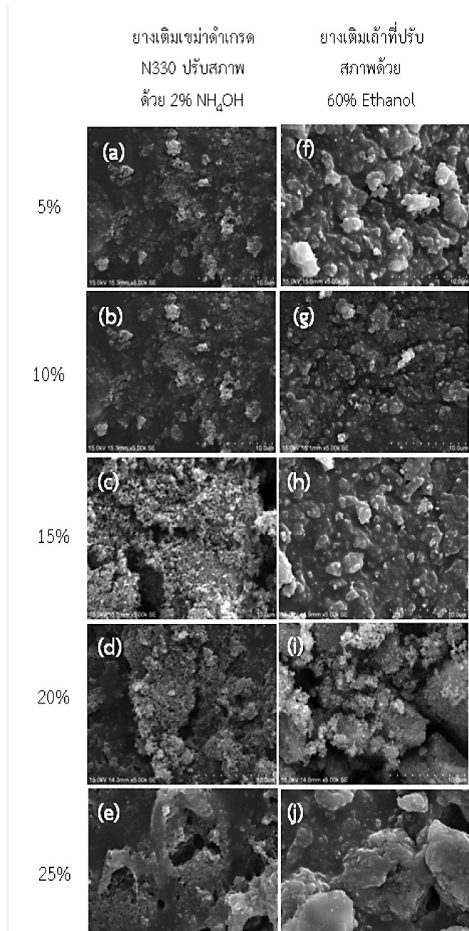
ไฮดรอกไซด์แล้วและการเติมถ่านที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ เมื่อเติมสารตัวเติมเหล่านี้ในสัดส่วนต่างกัน จากรูปจะพบว่าเขม่าดำสามารถกระจายตัวในฟิล์มยางได้ดีกว่าถ่านไฟโรไลซิสในทุกอัตราส่วนโดยสังเกตได้จากขนาดของกลุ่มอนุภาคเขม่าดำที่เล็กกว่าขนาดของกลุ่มอนุภาคถ่านไฟโรไลซิส และเมื่อปริมาณเขม่าดำหรือถ่านมากขึ้น อนุภาคมีโอกาสดับกลุ่มกันมากขึ้นทำให้การกระจายตัวของสารตัวเติมดังกล่าวแยกลง

3.2 ผลชนิดสารตัวเติมต่อค่าความต้านทานของฟิล์มยาง

ค่าความต้านทานของฟิล์มยางที่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำชนิด N330 และ N234 ที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ถ่านไฟโรไลซิสที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ เมื่อเติมสารตัวเติมความเข้มข้นตั้งแต่ 5–25% ของน้ำหนักยางแห้งแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าการเติมเขม่าดำชนิด N330 และ N234 ที่ปรับสภาพผิวด้วยเบส และถ่านที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ ช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้าของยางธรรมชาติซึ่งมีค่า 1×10^5 เมกะโอห์มต่อกรัมยางได้ โดยจะลดลงตามปริมาณเขม่าดำและถ่านไฟโรไลซิสที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำและถ่านไฟโรไลซิส มีองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนซึ่งมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีกว่ายางธรรมชาติซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า และเมื่อเปรียบเทียบชนิดสารตัวเติมพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของยางที่ผสมเขม่าดำ N234 มีค่าอยู่ในช่วง 10-100 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียงกับที่รายงานโดย Job และคณะ [2] และมีค่าน้อยกว่ายางที่ผสม N330 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10^2 ถึง 10^4 โอห์ม แต่ก็ยังน้อยกว่ายางที่ผสมด้วยถ่านไฟโรไลซิสซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^7 โอห์ม เนื่องจากถ่านไฟโรไลซิสมีองค์ประกอบของคาร์บอนอยู่เพียง 71.22 %w/w [1] จึงทำให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าน้อยกว่าการใช้ผงเขม่าดำซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน 99 %w/w อีกทั้งโครงสร้างของคาร์บอนที่อยู่ในถ่านไฟโรไลซิสจะมีโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับกราฟาไฟต์น้อยกว่าผงเขม่าดำ [4] ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของถ่านไฟโรไลซิน้อยกว่าเขม่าดำ

มีรายงานว่าความต้านทานของพอลิเมอร์ที่เป็นฉนวนหลายชนิดได้แก่ PECH, PEO, PIB และ PVP ซึ่งผสมด้วยผงเขม่าดำมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 โอห์ม [8] นอกจากนี้ยังมีรายงานค่าความต้านทาน

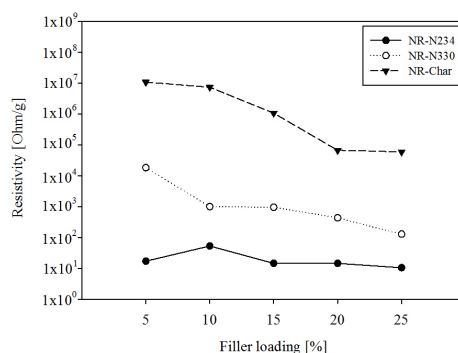
ไฟฟ้าของพอลิไธรีนที่เติมเส้นใยคาร์บอนว่าอยู่ในช่วง 17 ถึง 1.3×10^6 โอห์มขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมเส้นใยคาร์บอน [9] จากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นว่ายางที่ผสมด้วยเส้นใยไฟโรไลซิสที่ปรับสภาพการกระจายตัวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์มีค่าความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกับระบบข้างต้นซึ่งมีการศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ ทั้งนี้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และเอทิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ปรับสภาพผิวสารตัวเติมในงานวิจัยนี้ไม่น่าจะส่งผลต่อสภาพการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติ เนื่องจากสารทั้งสองชนิดเป็นสารระเหยง่าย โดยแอมโมเนียมมีจุดเดือดที่ 36°C และเอทิลแอลกอฮอล์มีจุดเดือดที่ 78.5°C ซึ่งคาดว่าสารทั้งสองน่าจะระเหยออกไปหมดในขั้นตอนการอบแห้งฟิล์มยาง



รูปที่ 4 ลักษณะหน้าตาของฟิล์มยางที่เติมเขม่าดำและเส้นใย

นอกจากนี้ Pantea และคณะ [4] รายงานว่าองค์ประกอบอื่นๆ ในเส้นใยที่ได้จากการไฟโรไลซิสยาง

ล้อยรถยนต์ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของเส้นใย และหากให้ความร้อนกับเส้นใยหลังการไฟโรไลซิส (post-pyrolysis) ในช่วงอุณหภูมิ $670-860^\circ\text{C}$ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น และการที่ฟิล์มยางที่ผสม N234 สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฟิล์มยางที่ผสม N330 เนื่องจาก N234 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19 nm ซึ่งเล็กกว่าอนุภาคเขม่าดำ N330 ที่มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 28 nm เขม่าดำ N234 จึงมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า

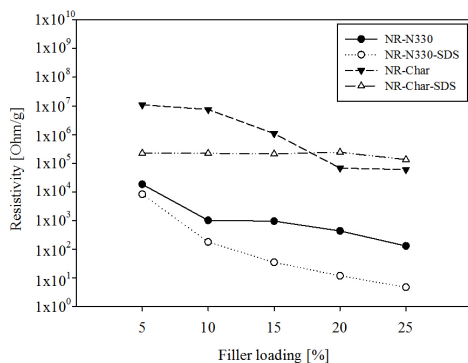


รูปที่ 5 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มยางที่เติมเขม่าดำ N234 เขม่าดำ N330 และเส้นใยไฟโรไลซิส

สำหรับยางที่เติมเส้นใยไฟโรไลซิสซึ่งปรับผิวด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้น พบว่าที่ปริมาณเส้นใย 5, 10, 15 และ 20 %w/w มีค่าความต้านทานมากกว่า 1×10^5 เมกะโอห์มต่อกรัมยาง [10] แต่เมื่อเติมเส้นใยไฟโรไลซิสปริมาณ 25 %w/w สามารถวัดค่าความต้านทานของยางที่เติมด้วยเส้นใยได้เท่ากับ 2.04×10^5 โอห์มต่อกรัมยาง อาจเนื่องมาจากเส้นใยไฟโรไลซิสมีกัมมันต์เป็นองค์ประกอบค่อนข้างมาก จึงทำให้พื้นที่ผิวของอนุภาคมีความเป็นกรดสูงเมื่อนำไปปรับสภาพผิวด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากันกับที่ใช้สำหรับเขม่าดำ จึงไม่สามารถทำให้เส้นใยกระจายตัวในยางได้ และส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าไม่ลดลง ดังนั้นในการทดลองต่อจากนี้จะปรับสภาพผิวของเส้นใยไฟโรไลซิสด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์เท่านั้น นอกจากนี้ ในงานวิจัยของอภิญา ภูนิคม [1] ยังพบว่าการล้างเส้นใยไฟโรไลซิสด้วยสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ทำให้ปริมาณสิ่งปนเปื้อนบนผิวของเส้นใยแบบไม่บดตอนเริ่มต้น ซึ่งมีสารอินทรีย์อยู่ 19.62 %w/w และปริมาณซิลเฟอรืเท่ากับ 34,339 ppm ลดลง 19.37 %w/w และ 5.35 %w/w ตามลำดับ

3.3 ผลของสารลดแรงตึงผิว SDS ต่อค่าความต้านทานของฟิล์มยาง

จากรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาผลของสารลดแรงตึงผิวพบว่า เมื่อปริมาณเคมีดำที่ปรับสภาพเพิ่มเติมด้วย SDS เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของฟิล์มยางที่เติมเคมีดำยิ่งลดลงจากกรณีที่ไม่ได้ใช้ SDS เนื่องจากผิวเคมีดำมีประจุเป็นลบเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นเบส [11] และในงานวิจัยนี้ได้ปรับสภาพผิวของเคมีดำด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นเบส ดังนั้นเมื่อเติมสาร SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ จึงทำให้เกิดการผลักระหว่าง SDS กับเคมีดำ จึงทำให้เคมีดำกระจายตัวในฟิล์มยางได้ดีขึ้น ส่วนในกรณีฟิล์มยางที่เติมเถ้าไฟโรไลซิส พบว่าเมื่อปริมาณเถ้าไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานของฟิล์มยางลดลงน้อยมากและมีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่ได้ใช้ SDS แค่เพียงช่วงที่เติมเถ้าจนถึง 15 %w/w



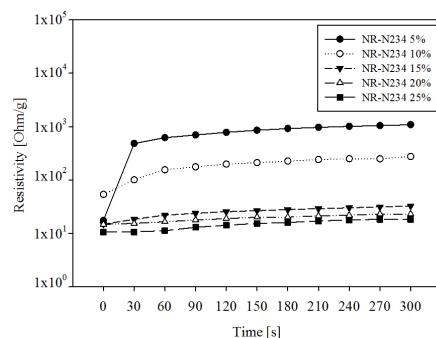
รูปที่ 6 ความต้านทานของฟิล์มยางที่ผสมสารตัวเติมเคมีดำ N330 และเถ้าไฟโรไลซิสในสภาวะที่ใช้และไม่ใช้สารลดแรงตึงผิว SDS

3.4 ผลของค่าความต้านทานของฟิล์มยางที่ใส่สารตัวเติมเมื่อนำไปดูดซับไอระเหยเฮกเซน

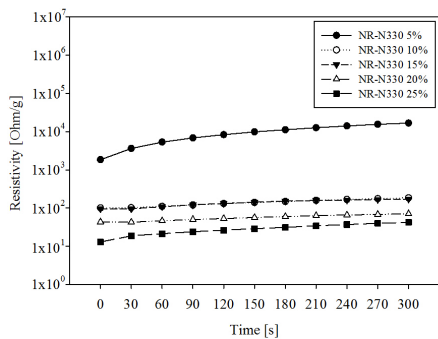
จากรูปที่ 7 ถึง 9 พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของยางที่ผสมเคมีดำและยางที่ผสมเถ้าไฟโรไลซิสที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นตามเวลา ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dong และคณะ [6] ซึ่งเป็นไปตามหลักการ percolation [5] กล่าวคือ จำนวนของกลุ่มอนุภาคต้องมากพอที่จะทำให้เกิดความใกล้ชิดกันจนทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันทั่วทั้งระบบ จึงจะทำให้ค่า

การนำไฟฟ้าที่ดี และเมื่อจำนวนกลุ่มอนุภาคเคมีดำเท่าเดิมและขนาดของกลุ่มอนุภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อฟิล์มยางเกิดการบวมตัวจึงทำให้กลุ่มอนุภาคอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการดูดซับไอระเหยเฮกเซนในอากาศอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ฟิล์มยางยังคงบวมตัวต่อไปยังผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตามเวลา ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้จึงแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุเหล่านี้ในการตรวจวัดไอระเหยเนื่องจากพบการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าเมื่อปริมาณไอระเหยในอากาศเปลี่ยนแปลงไป และในกรณีจะเห็นการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นซึ่งสามารถนำไปสร้างกราฟเทียบค่าได้สะดวก เพราะในการนำไปใช้งานจริงจำเป็นต้องมีการเทียบค่า (calibration) ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้ากับความเข้มข้นของไอระเหยในอากาศ ณ จุดสมดุล

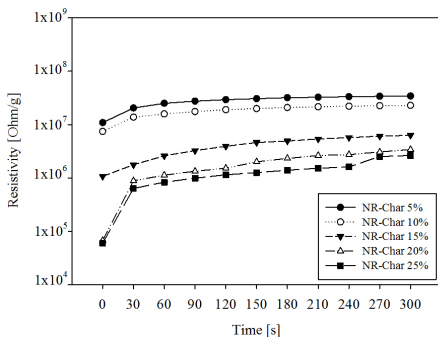
นอกจากนี้ยังพบว่าความต้านทานไฟฟ้าของยางที่เติม N234 ต่ำกว่ายางที่เติม N330 และเมื่อใช้เคมีดำปริมาณ 15-25 %w/w พบว่าค่าความต้านทานของตัวอย่างที่เติม N234 มีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบ แตกต่างจากตัวอย่าง N330 ที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงกว้างกว่า แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าของ N234 อันเนื่องมาจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่า และมีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟต์ที่ผิวมากกว่าซึ่งส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าเป็นอย่างมาก [4] ลักษณะของกราฟไฟต์ที่โค้งอบริเวณผิวของเคมีดำจะช่วยให้การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นอย่างดี ดังนั้นหากเคมีดำมีขนาดอนุภาคที่เล็กจะทำให้มีโครงสร้างคล้ายกราฟไฟต์ที่พื้นผิวมากขึ้นส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 ความต้านทานไฟฟ้าของยางที่ผสมเคมีดำ N234 ระหว่างดูดซับไอระเหยเฮกเซนเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 8 ความต้านทานไฟฟ้าของยางที่ผสมเขม่าดำ N330 ระหว่างดูดซับไอระเหยเฮกเซนเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 9 ความต้านทานไฟฟ้าของยางที่ผสมเถ้าไฟโรไลซิสที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ระหว่างดูดซับไอระเหยเฮกเซนเป็นเวลา 5 นาที

นอกจากนี้หากพิจารณาการเกิด percolation จะพบว่าหากใช้ปริมาณของสารตัวเติมเท่ากัน สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กกว่า หากสามารถทำให้กระจายตัวได้ดีแล้วจะมีกลุ่มอนุภาคที่กระจายตัวในฟิล์มได้มากกว่าและเกิดความใกล้ชิดของกลุ่มอนุภาคมากกว่า ส่งผลต่อการนำไฟฟ้าที่ต่อเนื่องขึ้นทั่วทั้งฟิล์ม

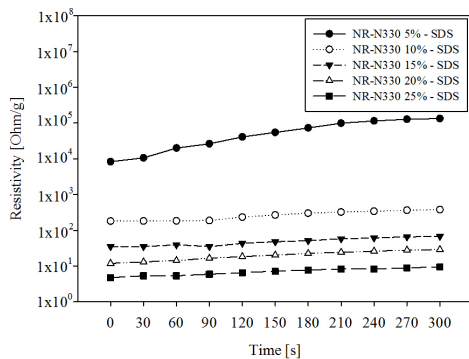
ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วว่าค่าความต้านทานของตัวอย่างที่เติมเถ้าไฟโรไลซิสมีค่าความต้านทานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเขม่าดำ แต่ในช่วงเวลาส่วนใหญ่จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านของทั้งสามตัวอย่างไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนักซึ่งบอกเป็นนัยว่าความอ่อนไหวของโครงสร้างเมื่อมีการดูดซับไอระเหยเฮกเซนไม่มีความแตกต่างกันมาก เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเติมปริมาณเขม่าดำชนิด N234 ที่ปริมาณ 5% ของน้ำหนักยางแห้ง และการเติมเถ้าไฟโรไลซิสปริมาณมากถึง 20-25% ของน้ำหนักยางแห้ง จะพบการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าอย่างรวดเร็วในช่วง 30 วินาทีแรก หลังจากนั้น

จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ คาดว่าการเติม N234 ที่ปริมาณ 5 %w/w จะทำให้ตัวอย่างมีความแข็งแรงน้อยจึงบวมตัวได้เร็ว ส่วนกรณีของเถ้าไฟโรไลซิสนั้น คาดว่าการเติมปริมาณที่มากถึง 20-25 %w/w ทำให้เถ้ากระจายตัวไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้บางส่วนเกิดการบวมตัวอย่างรวดเร็วซึ่งอาจไปตัดเส้นทางการนำไฟฟ้า ทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในช่วง 30 วินาทีแรก ตามทฤษฎีแล้วการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเรื่องดี เพราะมันแสดงถึงความอ่อนไหวในการตรวจจับไอระเหย ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการตรวจวัดไอระเหยที่มีความเข้มข้นต่ำสำหรับสารบางชนิดถึงแม้จะปนเปื้อนในอากาศเพียงปริมาณเล็กน้อยก็อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างมาก จึงเป็นเรื่องน่าสนใจหากจะสามารถเพิ่มความอ่อนไหวดังกล่าวให้กับโครงสร้างได้ ในหัวข้อต่อไปจะเปรียบเทียบเฉพาะผงเขม่าดำ N330 กับเถ้าไฟโรไลซิสเท่านั้นเนื่องจากเห็นได้ชัดเจนจากการทดลองนี้แล้วว่าผงเขม่าดำที่มีขนาดเล็กกว่าทำให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าดีกว่า

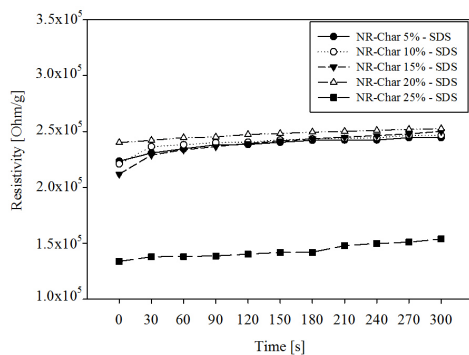
3.5 ค่าความต้านทานของฟิล์มยางที่ใช้สารลดแรงตึงผิว SDS เมื่อนำไปดูดซับไอระเหยเฮกเซน

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิว SDS น่าจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวของเขม่าดำ N330 ที่ปริมาณ 5% ของน้ำหนักยางแห้งได้ดีที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะที่ยางสามารถดูดซับไอระเหยของเฮกเซนได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากสารตัวเติมมีการกระจายตัวที่ดีและมีอัตราการดูดซับไอระเหยโดยพอลิเมอร์มากที่สุดและไม่มีอนุภาคตัวเติมกีดขวางการบวมตัวของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่ค่อนข้างชัดเจน

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิว SDS น่าจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวของเถ้าไฟโรไลซิสได้เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติมเท่ากันที่ 5%w/w จะเห็นว่าความต้านทานลดลงจากระดับ 10^7 เป็น 10^5 และที่ 25 %w/w ความต้านทานลดลงจากระดับ 10^6 กลายเป็น 10^5 โอห์มต่อกรัม ในขณะที่ดูดซับไอระเหยของเฮกเซนพบว่าฟิล์มยางมีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงแรกซึ่งสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีของการเติมเถ้าไม่เกิน 15% ของน้ำหนักยางแห้งเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มยางที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 10 ความต้านทานของฟิล์มยางที่เติมเขม่าดำ N330 ที่ปรับสภาพด้วยสาร SDS ระหว่างดูดซับไอระเหยเฮกเซนเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 11 ความต้านทานไฟฟ้าของยางที่เติมเถ้าไพโรไลซิส ที่ปรับสภาพผิวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์และ SDS ระหว่างดูดซับไอระเหยเฮกเซนเป็นเวลา 5 นาที

4. สรุป

จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าไพโรไลซิสที่เติมในยางสามารถลดค่าความต้านทานไฟฟ้าของยางธรรมชาติได้เพิ่มขึ้น และมีค่าอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^7 โอห์มซึ่งสูงกว่าฟิล์มยางที่เติมเขม่าดำชนิด N330 อยู่ถึงพันเท่าและสูงกว่ายางที่เติม N234 ถึงหลักหมื่นหรือแม้กระทั่งหนึ่งแสนเท่า แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่งานวิจัยอื่นศึกษากันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุในการตรวจวัดไอระเหยหรือวัดแรงกดอัด อย่างไรก็ตามการปรับปรุงการกระจายตัวของเถ้าจะช่วยลดความต้านทานลงได้กล่าวคือเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิว SDS ร่วมกับเอทิลแอลกอฮอล์จะสามารถลดความต้านลงได้ในหลักสิบถึงร้อยเท่า และเมื่อนำมาทดสอบการดูดซับไอระเหยของเฮกเซนพบว่าความว่องไวในการตรวจวัดเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ

ความต้านทานตามระยะเวลาที่ฟิล์มยางดูดซับไอระเหยมีความใกล้เคียงกับยางที่เติมเขม่าดำถึงแม้ว่าค่าความต้านทานจะยังสูงมากก็ตาม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์การสวนยาง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช บริษัท Thai Tokai Carbon Product และบริษัท Thai Carbon Black ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยางข้น เขม่าดำชนิด N234 และ N330 ตามลำดับ งานวิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 และเงินสนับสนุนจากโครงการการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Poonikom A. Preparation and investigation of activated carbon derived from pyrolytic used tire char [MSc thesis]. Faculty of Engineering; Thammasat University; 2012. (In Thai).
- [2] Job AE, Oliveira FA, Alves N, Giacometti JA, Mattoso LHC. Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors. Synthetic Met 2003;135-136:99-100.
- [3] Wang SL, Wang P, Ding TH. Development of wireless compressive/relaxation-stress measurement system integrated with pressure-sensitive carbon black-filled silicone rubber-based sensors. Sensor Actuat A-Phys 2010;157:36-41.
- [4] Pantea D, Darmstadt H, Kaliaguine S, Roy C. Heat-treatment of carbon blacks obtained by pyrolysis of used tires. Effect on the surface chemistry, porosity and electrical conductivity. J Anal Appl Pyrol 2003; 67(1):55-76.
- [5] Danwanichakul P, Glandt ED. Percolation and jamming in structures built through sequential deposition of particles. J Colloid Interf Sci 2005;283:41–8.

- [6] Dong XM, Fu RW, Zhang MQ, Zhang B, Rong MZ. Electrical resistance response of carbon black filled amorphous polymer composite sensors to organic vapor at low concentrations. *Carbon* 2004;42:2551–59.
- [7] Wongdao W, Danwanichakul P. Electrical Resistivity of poly (vinyl alcohol) nanofibrous structures filled with carbon black, self-dispersible carbon black and carbon nanotube, *KKU EN J* 2012;39(3):301-9. (In Thai).
- [8] Kessick R and Tepper G. Electrospun polymer composite fiber arrays for the detection and identification of volatile organic compounds, *Sensors and Actuators B* 2006;117:205-10.
- [9] Zhang B, Fu R, Zhang M, Dong X, Wang L, Pittman Jr. CU. Gas sensitive vapor grown carbon nanofiber/polystyrene sensors, *Materials Research Bulletin* 2006;41:553-62.
- [10] Saeoui P. Conductive rubber composite. *Rdctri Journal* 2008;2(1):11. (In Thai).
- [11] Sis H, Birinci M. Effect of nonionic and ionic surfactants on zeta potential and dispersion properties of carbon black powders. *Colloid Surface A* 2009;341:60-7.