

**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก**  
**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์**

## Enhancement of Electrical Conductivity of Natural Rubber by Addition of Carbon Black

Watcharapan Maneerat, Surat Areerat and Apinan Namkanisorn\*

*Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,*

*King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

*Corresponding Author E-mail: knapinan@kmitl.ac.th*

### Abstract

Thailand ranks as a world leader in the production of natural rubber. Most natural rubber produced is used as raw materials in various industries, including automobile, construction, agriculture, etc. One limitation that prevents larger usage of natural rubber in an automobile industry is poor electrical conductivity of natural rubber. Its electrical conductivity is typically in the orders of  $10^{-14} (\Omega/\text{sq.})^{-1}$ , which can be classified as insulator material. To make natural rubber suitable for practical applications such as electrical sensors, much higher electrical conductivity is required. This research aims to improve the electrical conductivity of natural rubber by addition of carbon black to make natural rubber-carbon black composite. Our experimental results have shown that the diameter of carbon black particle, structure and the content of carbon black play significant roles on the improvement of the conductivity of the rubber composite. In the material preparation steps, natural rubber latex was mixed with carbon black followed by heat curing in an oven at 150 °C for 1-2 hrs. After the specimen was cooled overnight, the cured rubber composite was cut into a small piece of 10 cm × 10 cm followed by surface resistivity measurement. By varying the content of carbon black from 5 – 25 phr, the conductivity was improved to about  $10^{-2} (\Omega/\text{sq.})^{-1}$ . Further addition of carbon black beyond 25 phr yielded no significant improvement of the electrical conductivity and segregation of the composite became more visible. High structure carbon black was found to be more effective in promoting the electrical conductivity of the composite compared to low structure carbon black.

### Keywords

*Natural Rubber; Carbon Black; Conducting Composite; Electrical Conductivity; Surface Resistivity*

### Introduction

Electrical conductive polymer composites have gained immense interests [2-13] in recent years due to a large variety of practical applications such as pressure, temperature and deformation-sensitive sensors. A simple model of electrical conductive polymer composite comprises of a matrix of insulating polymer filled with conductive particles such as carbon black or metal particle additives [2]. The electrical conductivity of polymeric composites depends on several factors including the type of the fillers, size, structure and content to which the filler is added to the matrix.

In this paper, composites of natural rubber (NR) and carbon black (CB) were prepared and their electrical properties were studied. The aim of this work is to improve the electrical conductivity of virgin rubber to a level suitable for practical uses. The electrical conductivity of virgin rubber is typically in the orders of  $10^{-14} (\Omega/\text{sq.})^{-1}$ , which can be classified as insulator material. To make natural rubber suitable for practical applications such as electrical sensors, much higher electrical conductivity is required and, thus, our goal is to increase the electrical conductivity to the orders of  $10^{-4}$ - $10^{-2} (\Omega/\text{sq.})^{-1}$ . The properties of carbon black investigated in this work include the content to which it is added to the composite, particle diameter and structure. The electrical behaviour of the composite is studied by measuring surface resistivities of the composite prepared from various conditions.

Subsequently, the values of surface resistivity were converted to electrical conductivity ( $\sigma$ ) in a unit of  $(\Omega/\text{sq.})^{-1}$  using the following equation

$$\sigma = \frac{1}{R} = \frac{L}{D} \cdot \frac{I}{V} \quad (1)$$

where  $R$  is surface resistivity  $(\Omega/\text{sq.})^{-1}$ ,  $V$  is the applied voltage (V),  $I$  is the electrical current (A),  $L$  is the separation distance between the two electrodes (cm) and  $D$  is the sample width (cm).

## Materials and Methods

### Natural Rubber

The natural latex rubber was obtained from Rubber Research Institute of Thailand. The rubber latex containing approximately 60%wt of solid rubber is stabilized with 0.6 wt% of ammonium hydroxide ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ).

### Carbon Black (CB)

Five different types of carbon black (Oil Furnace Black type) from Thai Tokai Carbon Product Company Limited were used as received (see Table 1 for description). The particle size and the complex structure as measured from DBP absorption was between 18-43 nm and 72-125 ml/100g, respectively.

**Table 1-** Physical Properties of Carbon Black Used in This Study [1].

Classification of CB	Average Particle Size (nm)	DBP Absorption (ml/100g)	Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Features
N220	22	114	345	Good processability. Strong reinforcement and high abrasion resistance.
N234	18	125	320	High abrasion resistance, high tensile strength.
N326	28	72	465	Low modulus, high tensile strength and elongation. Good abrasion resistance with low structure.
N330	28	102	375	High abrasion resistance, high tensile strength, proper modulus and sufficient elongation.
N339	24	120	345	High abrasion resistance. Good dispersion and processability with high structure.
N550	43	121	121	Excellent dynamic properties. Low shrinkage at extrusion molding and smoothest surface.

### Composite Preparation

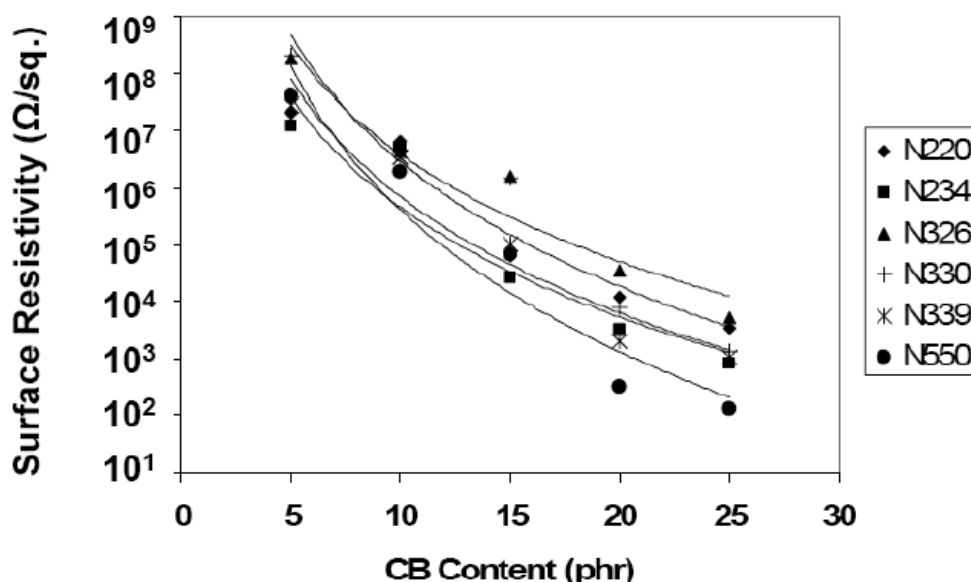
A dispersed solution of carbon black was prepared by mixing carbon black and dispersion agents in a ball mill for about 36 hrs. The dispersed carbon black solution was then mixed with latex rubber and various additives which include stearic acid, sulphur, ZDEC, wingstay-L, ZnO and TiO<sub>2</sub>. Composite of NR/CB was prepared by casting into a rectangular aluminium mold and heated cured at 150 °C for 1-2 hours to evaporate the volatile components. The composite of thickness in the order of 8 mm was obtained with NR/CB contents ranging from 100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 and 75/25 phr. The composite was kept in ambient air for 3 days before measuring surface resistivity.

### Resistivity Measurement

The NR/CB composite was cut into a square piece of 10 cm × 10 cm. Then the test piece was mounted on a sample holder and various voltages (100, 500 and 1000 Volts) were applied to the specimen depending on the resistance of the specimen (Figure 1). The value of electrical current across the specimen was recorded and was subsequently converted to the surface resistivity.

## Results and Discussion

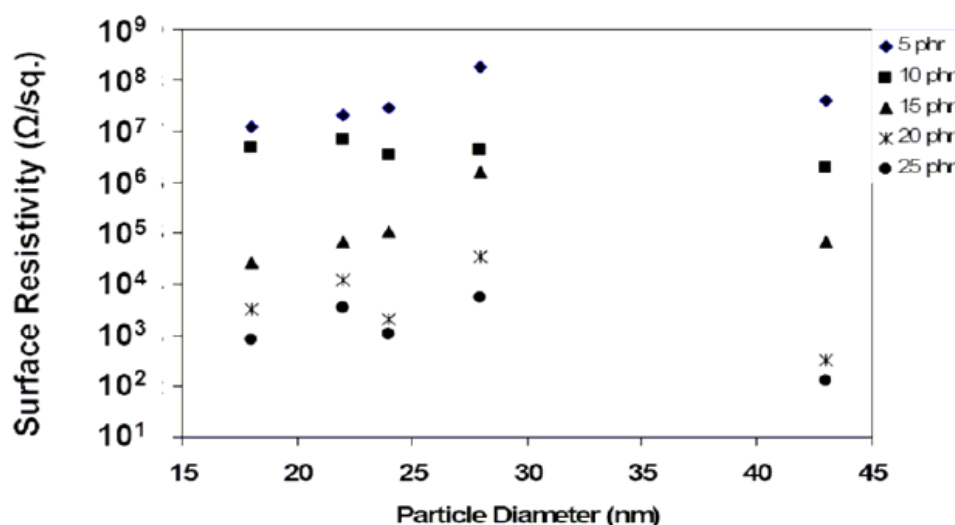
### Effect of CB Content on Surface Resistivity of Composite



**Figure 2:** Effect of CB Content on Surface Resistivity of Composite. Strong dependence of surface resistivity on the content of CB added to the composite is observed. Surface resistivity of a virgin rubber is in the orders of 14 Ω/sq.

Figure 2 shows the effect of CB content on the surface resistivity of the composite. The surface resistivity of a virgin rubber was as high as 10<sup>14</sup> Ω/sq. Addition of 5 wt% CB in the composite reduces the surface resistivity roughly by six orders of magnitude to 10<sup>8</sup> Ω/sq. This trend is observed for all types of CB used in this study. An increase of CB content in the composite further reduces surface resistivity down to 10<sup>4</sup> to 10<sup>2</sup> Ω/sq., depending on the type of CB used. For the content of CB above 25 wt% the composite cracked as a result of segregation of CB from the matrix of NR, thus we were unable to obtain the surface resistivity measurement. However, a nearly constant value of the electrical conductivity when the content of CB is above 20 wt% has been reported by Job *et. al.* [10].

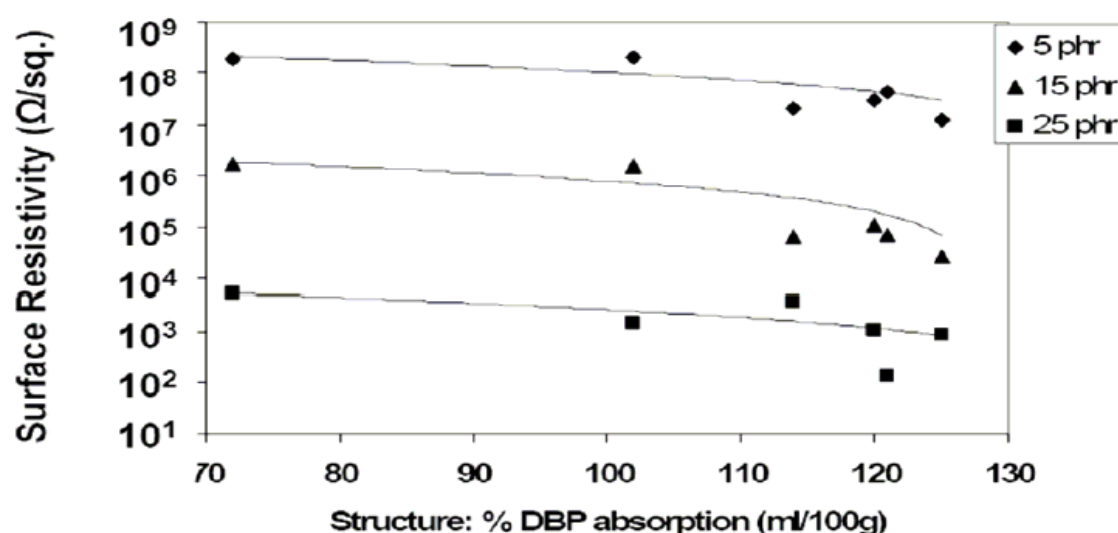
### Effect of Particle Diameter on Surface Resistivity of Composite



**Figure 3-** Effect of Particle Diameter on Surface Resistivity of Composite.

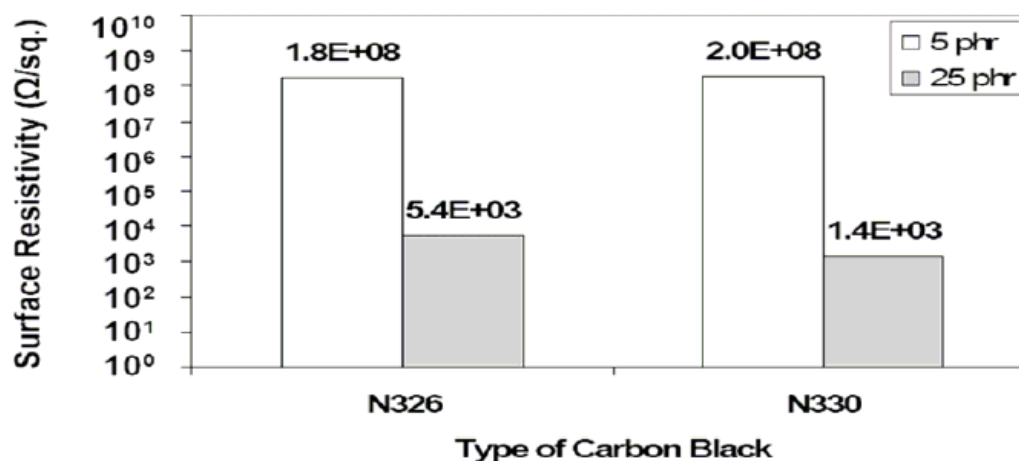
Figure 3 shows the dependence of surface resistivity on the particle diameter for composites made with NR/CB contents of 95/5, 90/10, 85/15, 80/20 and 75/25 phr. An increase in particle diameter from 18 to 28 nm results in increasing surface resistivities since the homogeneity of the composite decreases with increasing particle diameter. As a result, poorer electrical conductivity is obtained at higher CB diameter. However, a slight increase of the electrical conductivity is observed at the particle diameter of 43 nm. This may be attributed to the effect of high structure of CB that promotes the electrical conductivity. This type of CB has the highest structure compared to other types of CB used in this study.

### Effect of CB Structure on Surface Resistivity of Composite



**Figure 4-** Effect of CB Structure on Surface Resistivity of Composite.

Figure 4 shows the effect of carbon black structure on surface resistivity of composite. A comparison of surface resistivity of composites with varying CB contents from 95/5, 85/15 and 75/25 phr shows a reduction of surface resistivity as the carbon black structure becomes more complex. This is because high structure carbon black is highly branched and highly interconnected so that they form a network of particles, which can facilitate the movement of electrons across the matrix of the composite. As a result superior electrical conductivity can be achieved.



**Figure 5-** Effect of CB Content versus Structure. N326 and N330 are carbon black of equal particle diameter of 28 nm, but different structure and density.

Figure 5 shows a comparison of surface resistivity between two types of carbon black, namely N326 and N330 which have equal particle diameter of 28 nm, but different structure and density. N326 is a low structure carbon black with density of 465 kg/m<sup>3</sup>, whereas N330 has medium structure with lower density of 375 kg/m<sup>3</sup>. For low content CB composite (5 phr), the values of surface resistivity both for N326 and N330 composites are almost unchanged. The effect of structure is not so obvious here since the surface resistivity has been compensated by higher density of carbon black. On the other hand, at high content CB composite (25 phr), the difference in surface resistivity is more pronounced as indicated by about 74% reduction in surface resistivity.

## Conclusion

Surface resistivity of NR/CB composite can be significantly reduced by addition of carbon black particles. It was found that composites having large content of CB possess high electrical conductivity suitable for applications such as sensors. The particle diameter has an inverse effect on the electrical conductivity, whereas the conductivity improves with increasing complexity of the carbon black structure. It is worthwhile to further investigate the effects of variation in specimen's length (i.e., during tensile test) on electrical conductivity so that one can establish the relationship that would be useful for practical applications.

## Acknowledgements

The authors are thankful to Thailand Research Fund (TRF) for the financial support and Thai Tokai Carbon Product Company Limited for their generous supply of carbon black used in this study.

## References

1. Product Information, Thai Tokai Carbon Product Company Limited, 2005.
2. Knite M., Teteris V., Kiploka A. and Kaupuzs J. *Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials*. **J. Elsevier**. 2004; 110: 142 – 142.
3. Aneli J.N., Zaikov G.E. *Effects of Mechanical Deformations on the Structurization and electric conductivity of electric conducting polymer composites*. **J. Applied Polymer Science**. 1999; 74: 601 – 621.
4. Flandin L., Chang A., Nazarenko S., Hiltner A. and Baer E. *Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors*. **J. Applied Polymer Science**. 2000; 76: 894-905.
5. Flandin L., Brechet Y. and Cavaille J.-Y. *Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors*. **J. Elsevier Science**. 2001; 61: 895 – 901.
6. Knite M., Teteris V., Polyakov B. and Erts D. *Electric and elastic properties of conductive polymeric nanocomposites on macro- and nanoscales*. **J. Elsevier Science**. 2002; 19: 15-19.
7. Zhang X.W., Pan Y., Zheng Q. and Yi X-S. *Time dependence of piezoresistance for the conductor filled polymer composites*. **J. Polymer Science**. 2000; 38: 2739–2749.
8. Knite M., Teteris V. and Kiploka A. *The effect of plasticizing agent on strain-induced change of electric resistivity of carbon-polyisoprene nano-composites*. **J. Elsevier Science**. 2003; 23: 787–790.
9. Wu T-M. and Cheng J-C. *Morphology and electrical properties of carbon-black-filled poly( $\epsilon$ -caprolactone)/poly(vinyl butyral)*. **J. Applied Polymer Science**. 2003; 88: 1022–1031.
10. Job A.E., Oliveira F.A., Alves N., Giacometti J.A. and Mattoso L.H.C. *Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors*. **J. Elsevier Science** 2003; 135-136: 99–100.
11. Sau K.P., Chaki T.K. and Khastgir D. *The change in conductivity of a rubber-carbon black composite subjected to different modes of pre-strain*. **J. Elsevier Science**. 1998; 29A: 363–370.
12. Ali M.H. and Hashem A. Abo. *Percolation concept and the electrical conductivity of carbon black-polymer composites 2: Non-crystallisable chloroprene rubber mixed with HAF carbon black*. **J. Elsevier Science**. 1997; 68: 163–167.
13. Ali M.H. and Hashem A. Abo. *Percolation concept and the electrical conductivity of carbon black-polymer composites 3: Crystallisable chloroprene rubber mixed with FEF carbon black*. **J. Elsevier Science**. 1997; 68: 168–171.



## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลดิบของงานวิจัย และวิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า

#### ข.1 ข้อมูลดิบของงานวิจัย

การจำแนกวัสดุตามสภาพการนำไฟฟ้า แสดงในตารางที่ ข.1 โดยยางธรรมชาติมีสภาพการนำไฟฟ้า  $10^{-14}$ - $10^{-16} \Omega^{-1}$  โดยประมาณ ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าในการประยุกต์ทำยางธรรมชาติให้สามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ได้ต้องมีค่าสมบัติการนำไฟฟ้าตั้งแต่วัสดุถึงตัวนำขึ้นไปจนถึงวัสดุนำไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 ประเภทของวัสดุแบ่งตามสภาพการนำไฟฟ้า

ประเภทวัสดุ	สภาพการนำไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>	สภาพการนำไฟฟ้าเชิงปริมาตร ( $\Omega$ -cm) <sup>-1</sup>
วัสดุนำไฟฟ้า	$> 1 \times 10^{-5}$	$> 1 \times 10^{-4}$
วัสดุกึ่งตัวนำ	$1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-4}$
วัสดุฉนวนไฟฟ้า	$\leq 1 \times 10^{-12}$	$\leq 1 \times 10^{-11}$

ยางธรรมชาติมีสภาพการนำไฟฟ้า  $10^{-14}$ - $10^{-16} \Omega^{-1}$

ค่าการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็ก และสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางแสดงในตารางที่ ข.2 และ ข.3 เมื่อขึ้นรูปยางธรรมชาติที่ผสมกับสารเคมีที่ใช้การขึ้นรูปมีค่าการนำไฟฟ้า  $1.306 \times 10^{-14} \Omega^{-1}$  มีสมบัติในการนำไฟฟ้า คือเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งเป็นสมบัติโดยปกติของยางธรรมชาติ (มีค่าการนำไฟฟ้า  $10^{-14} - 10^{-16} \Omega^{-1}$ ) แสดงให้เห็นถึงสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยางไม่ส่งผลต่อสมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผ่านการขึ้นรูป โดยค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มผสมคาร์บอนแบล็กที่ 5 phr (ค่าการนำไฟฟ้า  $10^{-8} \Omega^{-1}$  โดยประมาณ) และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กขึ้น สภาพการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณคาร์บอนแบล็กที่ผสม คาร์บอนแบล็กจึงเป็นปัจจัยหลักในการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าของยางธรรมชาติในการวิจัยนี้

ตารางที่ ข.2 การนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กผง ( $\Omega$ )<sup>-1</sup>

ชนิดของคาร์บอนแบล็ก	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	ปริมาณการดูดซับของ DBP (ml/100g)	ความต้านทาน ( $\Omega$ )	การนำไฟฟ้า ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>
N220	22	114	18	0.056
N234	18	125	14	0.071
N326	28	72	34	0.029
N330	28	102	24	0.042
N339	24	120	38	0.026
N550	43	121	22	0.045

ตารางที่ ข.3 การนำไฟฟ้าของสารเคมีที่ใช้ขึ้นรูปยาง

ชนิดสารเคมี	ความต้านทาน ( $\Omega$ )	การนำไฟฟ้า( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>
Steric acid	$1.53 \times 10^6$	$6.518 \times 10^{-7}$
Sulfer	$203.46 \times 10^3$	$4.914 \times 10^{-6}$
Z D E C	$212.85 \times 10^3$	$4.698 \times 10^{-6}$
Z n O	$102.84 \times 10^3$	$9.723 \times 10^{-6}$
Wingstay-L	$132.12 \times 10^3$	$7.568 \times 10^{-6}$
TiO <sub>2</sub>	$17.24 \times 10^3$	$5.800 \times 10^{-5}$

\*\*\* สภาพการนำไฟฟ้าของ NR  $1.306 \times 10^{-14} \Omega^{-1}$

สมบัติในการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติที่ผสมคาร์บอนแบล็ก (ตารางที่ ข. 4) พบว่าเมื่อเริ่มผสมคาร์บอนแบล็กลงในยางธรรมชาติที่ 5 phr จะเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้าจาก  $10^{-14} \Omega^{-1}$  โดยประมาณของยางธรรมชาติ เป็น  $10^{-8} \Omega^{-1}$  โดยประมาณหลังจากใส่คาร์บอนแบล็ก 5 phr และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กลงในยางเพิ่มขึ้น สมบัติในการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแต่จะเข้าใกล้ค่าหนึ่งโดยที่คาร์บอนแบล็ก 25 phr ค่าการนำไฟฟ้าโดยประมาณคือ  $10^{-3} \Omega^{-1}$  การเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กลงในยางธรรมชาติต่อจากนี้ ค่าสภาพการนำไฟฟ้า จะเปลี่ยนแปลงไม่มาก

ตารางที่ ข.4 สมบัติการนำไฟฟ้ายางธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็ก

N220		N234		N326	
Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>	Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>	Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>
5	$4.912 \times 10^{-8}$	5	$8.425 \times 10^{-8}$	5	$5.631 \times 10^{-9}$
10	$1.456 \times 10^{-7}$	10	$2.035 \times 10^{-7}$	10	$2.281 \times 10^{-7}$
15	$1.528 \times 10^{-5}$	15	$3.807 \times 10^{-7}$	15	$6.201 \times 10^{-7}$
20	$8.063 \times 10^{-5}$	20	$3.036 \times 10^{-4}$	20	$2.840 \times 10^{-5}$
25	$2.846 \times 10^{-4}$	25	$1.180 \times 10^{-3}$	25	$1.866 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ข.4 (ต่อ) สมบัติการนำไฟฟ้ายางธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็ก

N330		N339		N550	
Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>	Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>	Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>
5	$5.074 \times 10^{-9}$	5	$3.519 \times 10^{-8}$	5	$2.461 \times 10^{-8}$
10	$2.185 \times 10^{-7}$	10	$2.858 \times 10^{-7}$	10	$5.234 \times 10^{-7}$
15	$6.767 \times 10^{-7}$	15	$9.634 \times 10^{-6}$	15	$1.491 \times 10^{-5}$
20	$1.293 \times 10^{-4}$	20	$4.818 \times 10^{-4}$	20	$3.113 \times 10^{-3}$
25	$7.364 \times 10^{-4}$	25	$5.382 \times 10^{-4}$	25	$7.691 \times 10^{-3}$

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup> (N234)						
	% $\Delta$ I = 10	% $\Delta$ I = 20	% $\Delta$ I = 30	% $\Delta$ I = 40	% $\Delta$ I = 50	% $\Delta$ I = 60	% $\Delta$ I = 100
5 phr	$9.231 \times 10^{-7}$	$8.860 \times 10^{-7}$	$8.560 \times 10^{-7}$	$8.118 \times 10^{-7}$	$7.594 \times 10^{-7}$	$6.793 \times 10^{-7}$	$4.512 \times 10^{-7}$
10 phr	$1.839 \times 10^{-6}$	$1.808 \times 10^{-6}$	$1.778 \times 10^{-6}$	$1.648 \times 10^{-6}$	$1.522 \times 10^{-6}$	$1.267 \times 10^{-6}$	$6.497 \times 10^{-7}$
15 phr	$3.719 \times 10^{-5}$	$2.946 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	$2.312 \times 10^{-5}$	$2.170 \times 10^{-5}$	$1.803 \times 10^{-5}$	$9.395 \times 10^{-6}$
20 phr	$2.251 \times 10^{-4}$	$2.234 \times 10^{-4}$	$2.159 \times 10^{-4}$	$2.281 \times 10^{-4}$	$2.242 \times 10^{-4}$	$2.337 \times 10^{-4}$	$2.041 \times 10^{-4}$
25 phr	$1.280 \times 10^{-3}$	$1.237 \times 10^{-3}$	$1.214 \times 10^{-3}$	$1.184 \times 10^{-3}$	$1.148 \times 10^{-3}$	$1.057 \times 10^{-3}$	$8.164 \times 10^{-4}$
30 phr	$1.625 \times 10^{-3}$	$1.589 \times 10^{-3}$	$1.535 \times 10^{-3}$	$1.498 \times 10^{-3}$	$1.470 \times 10^{-3}$	$1.418 \times 10^{-3}$	$1.212 \times 10^{-3}$
40 phr	$2.257 \times 10^{-3}$	$2.076 \times 10^{-3}$	$2.117 \times 10^{-3}$	$2.062 \times 10^{-3}$	$2.044 \times 10^{-3}$	$1.942 \times 10^{-3}$	$1.700 \times 10^{-3}$

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup> (N220)						
	% $\Delta$ I = 10	% $\Delta$ I = 20	% $\Delta$ I = 30	% $\Delta$ I = 40	% $\Delta$ I = 50	% $\Delta$ I = 60	% $\Delta$ I = 100
5 phr	$3.977 \times 10^{-7}$	$4.081 \times 10^{-7}$	$3.989 \times 10^{-7}$	$3.844 \times 10^{-7}$	$3.596 \times 10^{-7}$	$3.392 \times 10^{-7}$	$2.559 \times 10^{-7}$
10 phr	$6.361 \times 10^{-7}$	$6.205 \times 10^{-7}$	$5.713 \times 10^{-7}$	$5.417 \times 10^{-7}$	$5.111 \times 10^{-7}$	$4.742 \times 10^{-7}$	$3.735 \times 10^{-7}$
15 phr	$1.220 \times 10^{-5}$	$1.152 \times 10^{-5}$	$1.046 \times 10^{-5}$	$1.013 \times 10^{-5}$	$9.569 \times 10^{-6}$	$9.304 \times 10^{-6}$	$8.354 \times 10^{-6}$
20 phr	$3.041 \times 10^{-4}$	$2.609 \times 10^{-4}$	$2.425 \times 10^{-4}$	$2.139 \times 10^{-4}$	$2.246 \times 10^{-4}$	$2.028 \times 10^{-4}$	-
25 phr	$5.220 \times 10^{-5}$	$5.832 \times 10^{-5}$	$5.906 \times 10^{-5}$	$5.713 \times 10^{-5}$	$6.051 \times 10^{-5}$	$6.175 \times 10^{-5}$	$6.119 \times 10^{-5}$
30 phr	$4.657 \times 10^{-4}$	$4.166 \times 10^{-4}$	$4.475 \times 10^{-4}$	$4.763 \times 10^{-4}$	$4.644 \times 10^{-4}$	$4.284 \times 10^{-4}$	$3.870 \times 10^{-4}$
40 phr	$3.547 \times 10^{-3}$	$3.600 \times 10^{-3}$	$3.573 \times 10^{-3}$	$3.536 \times 10^{-3}$	$3.465 \times 10^{-3}$	$3.439 \times 10^{-3}$	$3.009 \times 10^{-3}$

\*\*\* ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยืดขาด

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup> (N339)						
	% $\Delta I$ = 10	% $\Delta I$ = 20	% $\Delta I$ = 30	% $\Delta I$ = 40	% $\Delta I$ = 50	% $\Delta I$ = 60	% $\Delta I$ = 100
5 phr	$2.711 \times 10^{-7}$	$2.456 \times 10^{-7}$	$2.196 \times 10^{-7}$	$2.030 \times 10^{-7}$	$1.839 \times 10^{-7}$	$1.673 \times 10^{-7}$	$1.011 \times 10^{-7}$
10 phr	$1.487 \times 10^{-6}$	$1.201 \times 10^{-6}$	$1.106 \times 10^{-6}$	$1.081 \times 10^{-6}$	$9.531 \times 10^{-7}$	$8.535 \times 10^{-7}$	$6.790 \times 10^{-7}$
15 phr	$1.525 \times 10^{-5}$	$1.248 \times 10^{-5}$	$1.126 \times 10^{-5}$	$1.117 \times 10^{-5}$	$1.110 \times 10^{-5}$	$1.032 \times 10^{-5}$	$1.023 \times 10^{-5}$
20 phr	$2.928 \times 10^{-4}$	$2.835 \times 10^{-4}$	$2.679 \times 10^{-4}$	$2.439 \times 10^{-4}$	$2.107 \times 10^{-4}$	$2.055 \times 10^{-4}$	-
25 phr	$4.416 \times 10^{-5}$	$3.863 \times 10^{-5}$	$3.826 \times 10^{-5}$	$3.766 \times 10^{-5}$	$3.644 \times 10^{-5}$	$3.423 \times 10^{-5}$	$2.835 \times 10^{-5}$
30 phr	$5.139 \times 10^{-4}$	$4.813 \times 10^{-4}$	$4.803 \times 10^{-4}$	$4.766 \times 10^{-4}$	$4.929 \times 10^{-4}$	$4.811 \times 10^{-4}$	$4.352 \times 10^{-4}$
40 phr	$2.106 \times 10^{-3}$	$2.101 \times 10^{-3}$	$2.135 \times 10^{-3}$	$2.143 \times 10^{-3}$	$2.060 \times 10^{-3}$	$2.030 \times 10^{-3}$	$1.737 \times 10^{-3}$

\*\*\* ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยืดขาด

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup> (N326)						
	% $\Delta I$ = 10	% $\Delta I$ = 20	% $\Delta I$ = 30	% $\Delta I$ = 40	% $\Delta I$ = 50	% $\Delta I$ = 60	% $\Delta I$ = 100
5 phr	$2.698 \times 10^{-7}$	$2.677 \times 10^{-7}$	$2.582 \times 10^{-7}$	$2.471 \times 10^{-7}$	$2.356 \times 10^{-7}$	$2.201 \times 10^{-7}$	$1.467 \times 10^{-7}$
10 phr	$2.526 \times 10^{-7}$	$2.463 \times 10^{-7}$	$2.438 \times 10^{-7}$	$2.424 \times 10^{-7}$	$2.323 \times 10^{-7}$	$2.272 \times 10^{-7}$	$1.581 \times 10^{-7}$
15 phr	$2.840 \times 10^{-6}$	$2.679 \times 10^{-6}$	$2.416 \times 10^{-6}$	$2.314 \times 10^{-6}$	$2.234 \times 10^{-6}$	$1.453 \times 10^{-6}$	$7.547 \times 10^{-7}$
20 phr	$1.307 \times 10^{-5}$	$1.046 \times 10^{-5}$	$9.397 \times 10^{-6}$	$8.868 \times 10^{-6}$	$9.196 \times 10^{-6}$	$8.990 \times 10^{-6}$	$7.793 \times 10^{-6}$
25 phr	$4.066 \times 10^{-5}$	$4.274 \times 10^{-5}$	$4.199 \times 10^{-5}$	$3.983 \times 10^{-5}$	$4.123 \times 10^{-5}$	$3.857 \times 10^{-5}$	$3.591 \times 10^{-5}$
30 phr	$7.369 \times 10^{-5}$	$7.081 \times 10^{-5}$	$6.951 \times 10^{-5}$	$6.933 \times 10^{-5}$	$6.701 \times 10^{-5}$	$6.499 \times 10^{-5}$	$5.571 \times 10^{-5}$
40 phr	$1.714 \times 10^{-4}$	$1.604 \times 10^{-4}$	$1.248 \times 10^{-4}$	$1.222 \times 10^{-4}$	$1.198 \times 10^{-4}$	$1.182 \times 10^{-4}$	$8.267 \times 10^{-4}$

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup> (N330)						
	% $\Delta$ I = 10	% $\Delta$ I = 20	% $\Delta$ I = 30	% $\Delta$ I = 40	% $\Delta$ I = 50	% $\Delta$ I = 60	% $\Delta$ I = 100
5 phr	$1.289 \times 10^{-6}$	$1.028 \times 10^{-6}$	$9.234 \times 10^{-7}$	$1.621 \times 10^{-7}$	$1.385 \times 10^{-7}$	$1.164 \times 10^{-7}$	-
10 phr	$1.242 \times 10^{-6}$	$1.204 \times 10^{-6}$	$1.128 \times 10^{-6}$	$1.044 \times 10^{-6}$	$8.893 \times 10^{-7}$	$7.472 \times 10^{-7}$	$6.044 \times 10^{-7}$
15 phr	$4.562 \times 10^{-6}$	$4.422 \times 10^{-6}$	$4.343 \times 10^{-6}$	$4.248 \times 10^{-6}$	$4.197 \times 10^{-6}$	$4.110 \times 10^{-6}$	$3.711 \times 10^{-6}$
20 phr	$7.234 \times 10^{-6}$	$6.664 \times 10^{-6}$	$6.331 \times 10^{-6}$	$6.075 \times 10^{-6}$	$5.904 \times 10^{-6}$	$5.792 \times 10^{-7}$	$3.159 \times 10^{-6}$
25 phr	$2.727 \times 10^{-5}$	$3.764 \times 10^{-5}$	$4.361 \times 10^{-5}$	$4.426 \times 10^{-5}$	$4.486 \times 10^{-5}$	$4.411 \times 10^{-5}$	-
30 phr	$2.748 \times 10^{-4}$	$2.554 \times 10^{-4}$	$2.417 \times 10^{-4}$	$2.510 \times 10^{-4}$	$2.320 \times 10^{-4}$	$2.215 \times 10^{-4}$	$1.442 \times 10^{-4}$
40 phr	$1.552 \times 10^{-3}$	$1.633 \times 10^{-3}$	$1.653 \times 10^{-3}$	$1.749 \times 10^{-3}$	$1.745 \times 10^{-3}$	$1.736 \times 10^{-3}$	$1.548 \times 10^{-3}$

\*\*\* ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยืดขาด

ตารางที่ ข.5 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืด

Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup> (N550)						
	% $\Delta$ I = 10	% $\Delta$ I = 20	% $\Delta$ I = 30	% $\Delta$ I = 40	% $\Delta$ I = 50	% $\Delta$ I = 60	% $\Delta$ I = 100
5 phr	$8.987 \times 10^{-7}$	$6.164 \times 10^{-7}$	$5.441 \times 10^{-7}$	$4.013 \times 10^{-7}$	$1.474 \times 10^{-7}$	$8.829 \times 10^{-8}$	$5.550 \times 10^{-8}$
10 phr	$1.723 \times 10^{-6}$	$1.646 \times 10^{-6}$	$1.544 \times 10^{-6}$	$1.345 \times 10^{-6}$	$1.050 \times 10^{-6}$	$8.430 \times 10^{-7}$	$2.887 \times 10^{-7}$
15 phr	$6.929 \times 10^{-5}$	$6.126 \times 10^{-5}$	$5.787 \times 10^{-5}$	$5.017 \times 10^{-5}$	$4.342 \times 10^{-5}$	$3.879 \times 10^{-5}$	-
20 phr	$1.348 \times 10^{-4}$	$1.280 \times 10^{-4}$	$1.167 \times 10^{-4}$	$1.220 \times 10^{-4}$	$1.146 \times 10^{-4}$	$1.092 \times 10^{-4}$	$4.963 \times 10^{-5}$
25 phr	$5.493 \times 10^{-5}$	$5.056 \times 10^{-5}$	$4.680 \times 10^{-5}$	$4.222 \times 10^{-5}$	$4.029 \times 10^{-5}$	$3.680 \times 10^{-5}$	$4.258 \times 10^{-5}$
30 phr	$2.342 \times 10^{-4}$	$2.503 \times 10^{-4}$	$2.670 \times 10^{-4}$	$2.705 \times 10^{-4}$	$2.819 \times 10^{-4}$	$2.734 \times 10^{-4}$	$2.219 \times 10^{-4}$
40 phr	$6.579 \times 10^{-4}$	$6.308 \times 10^{-4}$	$6.790 \times 10^{-4}$	$7.361 \times 10^{-4}$	$7.719 \times 10^{-4}$	$7.964 \times 10^{-4}$	$8.248 \times 10^{-4}$

\*\*\* ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ตำแหน่งที่วัสดุเชิงประกอบขณะยืดขาด

ตารางที่ ข.6 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิด	Conc.	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>					
		30 °c	40 °c	50 °c	60 °c	70 °c	80 °c
N234	5phr	$9.330 \times 10^{-7}$	$1.011 \times 10^{-7}$	$1.808 \times 10^{-7}$	$8.744 \times 10^{-8}$	$5.390 \times 10^{-8}$	-
	15phr	$3.986 \times 10^{-5}$	$4.900 \times 10^{-5}$	$5.729 \times 10^{-5}$	$6.886 \times 10^{-5}$	$6.619 \times 10^{-5}$	$5.673 \times 10^{-5}$
	25phr	$3.748 \times 10^{-3}$	$4.110 \times 10^{-3}$	$4.659 \times 10^{-3}$	$5.296 \times 10^{-3}$	$5.436 \times 10^{-3}$	$4.410 \times 10^{-3}$
	40phr	$2.375 \times 10^{-2}$	$2.660 \times 10^{-2}$	$2.780 \times 10^{-2}$	$2.926 \times 10^{-2}$	$3.118 \times 10^{-2}$	$2.717 \times 10^{-2}$
N220	5phr	$3.644 \times 10^{-7}$	$3.797 \times 10^{-7}$	$7.152 \times 10^{-8}$	$7.198 \times 10^{-9}$	-	-
	15phr	$2.633 \times 10^{-5}$	$3.914 \times 10^{-5}$	$4.523 \times 10^{-5}$	$5.077 \times 10^{-5}$	$3.866 \times 10^{-5}$	$2.871 \times 10^{-5}$
N339	15phr	$2.774 \times 10^{-5}$	$3.813 \times 10^{-5}$	$4.838 \times 10^{-5}$	$5.183 \times 10^{-5}$	$3.924 \times 10^{-5}$	$3.190 \times 10^{-5}$
N326	15phr	$9.425 \times 10^{-6}$	$1.094 \times 10^{-5}$	$1.633 \times 10^{-5}$	$1.745 \times 10^{-5}$	$1.551 \times 10^{-5}$	$1.510 \times 10^{-5}$
N330	5phr	$2.709 \times 10^{-7}$	$3.084 \times 10^{-7}$	$5.363 \times 10^{-8}$	$7.160 \times 10^{-9}$	-	-
	15phr	$1.960 \times 10^{-5}$	$2.144 \times 10^{-5}$	$2.385 \times 10^{-5}$	$2.597 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.093 \times 10^{-5}$
N550	5phr	$8.162 \times 10^{-7}$	$8.300 \times 10^{-7}$	$1.525 \times 10^{-7}$	$7.436 \times 10^{-8}$	$2.299 \times 10^{-8}$	-
	15phr	$9.606 \times 10^{-5}$	$1.018 \times 10^{-4}$	$1.238 \times 10^{-4}$	$1.272 \times 10^{-4}$	$1.270 \times 10^{-4}$	$1.154 \times 10^{-4}$
	25phr	$2.340 \times 10^{-3}$	$2.638 \times 10^{-3}$	$2.960 \times 10^{-3}$	$3.075 \times 10^{-3}$	$3.200 \times 10^{-3}$	$3.038 \times 10^{-3}$
	40phr	$1.069 \times 10^{-2}$	$1.258 \times 10^{-2}$	$1.509 \times 10^{-2}$	$1.571 \times 10^{-2}$	$1.610 \times 10^{-2}$	$1.588 \times 10^{-2}$

\*\*\* ตำแหน่งที่ไม่มีข้อมูล คือ ไม่สามารถวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าได้

ตารางที่ ข.7 สมบัติการนำไฟฟ้าของธรรมชาติที่ใส่คาร์บอนแบล็กขณะดึงยืดที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิด	ระยะ (%Δl)	Conductivity ( $\Omega$ ) <sup>-1</sup>					
		30 °c	40 °c	50 °c	60 °c	70 °c	80 °c
N234-15%	0	$4.093 \times 10^{-5}$	$5.319 \times 10^{-5}$	$6.457 \times 10^{-5}$	$6.715 \times 10^{-5}$	$6.552 \times 10^{-5}$	$6.442 \times 10^{-5}$
	10	$2.965 \times 10^{-5}$	$3.334 \times 10^{-5}$	$3.487 \times 10^{-5}$	$3.498 \times 10^{-5}$	$3.320 \times 10^{-5}$	$2.840 \times 10^{-5}$
	20	$2.484 \times 10^{-5}$	$2.804 \times 10^{-5}$	$2.946 \times 10^{-5}$	$3.065 \times 10^{-5}$	$3.055 \times 10^{-5}$	$2.903 \times 10^{-5}$
	30	$2.235 \times 10^{-5}$	$2.343 \times 10^{-5}$	$2.441 \times 10^{-5}$	$2.459 \times 10^{-5}$	$2.312 \times 10^{-5}$	$2.256 \times 10^{-5}$
	40	$2.068 \times 10^{-5}$	$2.165 \times 10^{-5}$	$2.163 \times 10^{-5}$	$2.227 \times 10^{-5}$	$2.138 \times 10^{-5}$	$2.090 \times 10^{-5}$
	50	$1.883 \times 10^{-5}$	$1.943 \times 10^{-5}$	$2.011 \times 10^{-5}$	$2.065 \times 10^{-5}$	$1.989 \times 10^{-5}$	$1.947 \times 10^{-5}$
	60	$1.479 \times 10^{-5}$	$1.492 \times 10^{-5}$	$1.526 \times 10^{-5}$	$1.601 \times 10^{-5}$	$1.555 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-5}$
	100	$8.434 \times 10^{-6}$	$8.592 \times 10^{-6}$	$8.721 \times 10^{-6}$	$8.687 \times 10^{-6}$	$8.549 \times 10^{-6}$	$8.472 \times 10^{-5}$

## ข.2 วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า



Trek Application Note

Number 1005

# Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

William A. Maryniak, Toshio Uehara, Maciej A. Noras

**Abstract** The relationship between surface resistivity and surface resistance is established and explained.

## 1 Introduction

Concepts of surface resistance and surface resistivity can be sometimes confusing. Definitions of both terms can be found in many books and standards [1–4]. Surface resistance,  $R_s$ , is defined in all of the aforementioned literature sources as the ratio of a DC voltage  $U$  to the current,  $I_s$  flowing between two electrodes of specified configuration that are in contact with the same side of a material under test (Figure 1).

$$R_s = \frac{U}{I_s} \quad (1)$$

Surface resistivity  $\rho_s$ , on the other hand, is determined by the ratio of DC voltage  $U$  drop per unit length  $L$  to the surface current  $I_s$  per unit width  $D$ .

$$\rho_s = \frac{\frac{U}{L}}{\frac{I_s}{D}} \quad (2)$$

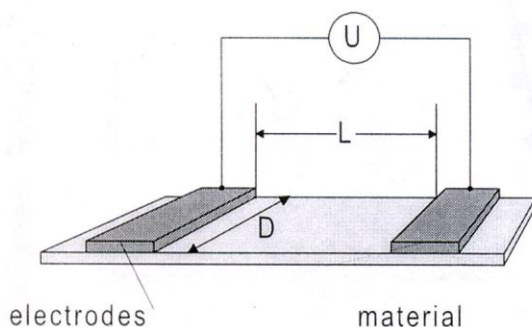


Figure 1: Basic setup for surface resistance and surface resistivity measurement.

Surface resistivity is a property of a material. Theoretically it should remain constant regardless of

the method and configuration of the electrodes used for the surface resistivity measurement. A result of the surface resistance measurement depends on both the material and the geometry of the electrodes used in the measurement. The physical unit of surface resistivity is Ohm ( $\Omega$ ). The legitimate unit of the surface resistance is also Ohm. Because of that surface resistivity and the surface resistance are often mixed up. In order to differentiate between the two, surface resistivity is often expressed also in Ohm/square ( $\Omega/\text{sq.}$ ) which is not a valid unit from the dimensional analysis point of view.

## 2 Surface resistivity and surface resistance

### 2.1 Current density and surface current density

It is possible to establish a relationship between the surface resistance and surface resistivity for any electrode configuration. An idea of the current density is very helpful in understanding of that relationship. Consider two samples of a material as shown in Figure 2. With a constant voltage  $U$  and both samples made of the same material the amount of current flowing through the material will be different. The thicker bar (sample #1) conducts "more easily" than the thin bar (sample #2). One may use a water pipe analogy - given a constant water pressure, there will be more water per unit time coming through the pipe with a larger diameter. The flow density, be it water or electric current, is the amount of flow passing through a unit area of the pipe or the sample of the material. The surface area is perpendicular to the direction of the flowing current (or water).

TREK, INC. • 11601 Maple Ridge Road • Medina, NY 14103 • Tel: (585) 798-3140

Call: 1 800 FOR TREK • FAX: (585) 798-3106 • E-mail: sales@trekinc.com • Web: www.trekinc.com







## Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

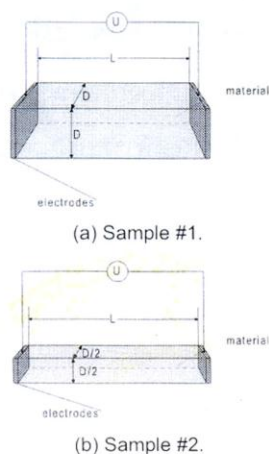


Figure 2: Current density.

When the voltage  $U$  is kept constant, the current density for the thin and the thick bar is the same. The electric current density is often expressed by:

$$J = \frac{I}{S}$$

where  $I$  is the current and  $S$  is the surface area, and is measured in  $[A/m^2]$ . Surface current density is the next concept helpful in understanding the relationship between the surface resistance and surface resistivity. Consider Figure 1, where both electrodes are on the same side of the material. It is assumed that electric current flows on the surface of the material only. In reality, this is not exactly true. There is always a portion of that current flowing through the bulk of the material. However, in order to make it possible to compare surface properties of various materials, it had been presumed that the surface current flows through infinitesimally thin surface layer. This layer is so thin, that the thickness of it can be neglected. Surface current density  $J_s$  is therefore defined as:

$$J_s = \frac{I}{D},$$

where  $D$  is a width of the electrode.

### 2.2 Concentric ring electrodes configuration

The relationship between surface resistivity and the surface resistance for a concentric ring probe geometry can be found by defining a surface current density in the area between rings. Knowing the surface current density, it is possible to find an electric field intensity between the electrode rings (Figure 3).

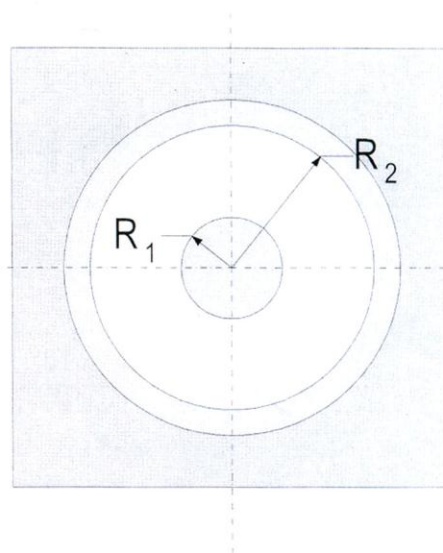


Figure 3: Surface resistance and surface resistivity measurement configuration for concentric ring electrodes.

Define:

- $R_1$  outer radius of the center electrode,
- $R_2$  inner radius of the outer ring electrode,

as it is shown in Figure 3 (see also Figure 5). The surface current density  $J_s$  for a concentric rings configuration is determined as:

$$J_s = \frac{I_s}{2\pi r}, \quad (3)$$





## Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

where the radius  $r$  varies from  $R_1$  to  $R_2$ . It is important to remember that when testing the surface resistivity (or resistance) of any material, it is assumed that all the currents flow between electrodes along the surface and do not penetrate into the bulk of the material. In order to ensure that the surface currents are measured properly, some more advanced techniques for surface resistivity measurements have been developed [1,2,4]. The Ohm's law describes relationship between a current density  $J$  and an electric field intensity  $E$ . It is also valid for the surface currents:

$$J_s = \frac{E}{\rho_s}, \quad (4)$$

Therefore, it is possible to find electric field between the concentric rings by solving the following dependency (using equation 3 and 4):

$$E = \frac{\rho_s I_s}{2\pi \cdot r}, \quad (5)$$

The voltage between electrodes can be found by integrating the electric field  $E$  from  $R_1$  to  $R_2$ :

$$\begin{aligned} U_{R_1, R_2} &= \int_{R_1}^{R_2} E \, dr = \\ &= \int_{R_1}^{R_2} \frac{\rho_s I_s}{2\pi \cdot r} \, dr \\ &= \frac{\rho_s I_s}{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{r} \, dr \\ &= \frac{\rho_s I_s}{2\pi} \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Substituting  $R_s = \frac{U}{I_s}$ :

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (7)$$

After rearrangements, the surface resistivity is related to the surface resistance by a constant that depends on the geometry of the electrodes only:

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)} = R_s \cdot k \quad (8)$$

Where  $k$  is frequently called a geometry coefficient.



Figure 4: Surface resistivity measurement setup.

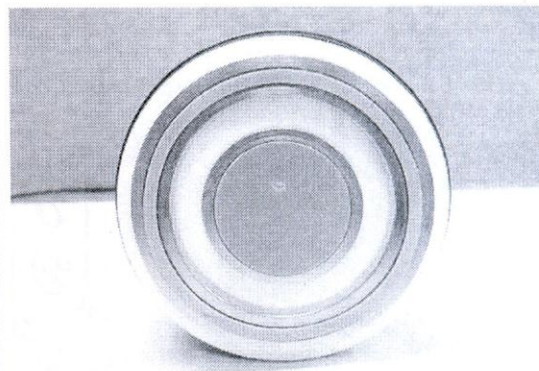


Figure 5: Concentric ring probe.

Figure 4 presents a typical surface resistivity measurement setup using a resistivity meter and a concentric ring probe (Figure 5). The resistivity meter is capable of measuring surface resistivities directly, utilizing various configuration of







## Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements Using a Concentric Ring Probe Technique

electrodes. Meter provides a constant voltage  $U$  and measures the current  $I$  flowing between electrodes. Resistance  $R_s$  is then easily calculated and the value of resistivity is equal to the value of resistance multiplied by the geometry coefficient. Usually electrodes are especially constructed to simplify calculations of surface resistivity and the geometry coefficient is equal to a simple integer. Most of industrial standards use this simplified approach [1, 2, 4].

**Example 1:** Consider the following measurement configuration:

$$R_1 = 15.3 \text{ [mm]},$$

$$R_2 = 28.6 \text{ [mm]},$$

$$U = 10 \text{ [V]}.$$

The current measured during the test was equal to  $I_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ [A]}$ . The surface resistivity of the material under test can be calculated from the equation 8:

$$\begin{aligned} \rho_s &= R_s \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \\ &= \frac{U}{I_s} \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \\ &= \frac{10 \text{ [V]}}{10^{-6} \text{ [A]}} \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{28.6 \text{ [mm]}}{15.3 \text{ [mm]}}\right)} = \\ &= 10^7 \text{ [\Omega]} \cdot \frac{2\pi}{\ln(1.869)} = \\ &= 10^7 \text{ [\Omega]} \cdot 10 = \\ &= 10^8 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

### 3 Additional remarks

While conducting the surface resistivity and the surface resistance tests, it is important to consider

some additional components affecting the test results. The electric resistivity of any dielectric material depends on many environmental factors. It can change with humidity, temperature, etc. For this reason it is recommended to condition the test sample before the measurement. Another important aspect is to ensure a proper contact between electrodes and the tested material. Electrode systems can be made of various materials and may come in various shapes and configurations. The way of electrode contacts the material under test has a very significant influence on the result of a measurement. The DC voltage level used for testing is also an important issue. Usually resistivity of the material depends on the value of the applied voltage and the time span during which the sample was energized. All these contributing factors and criteria are described in appropriate guides and standards [1–4].

### References

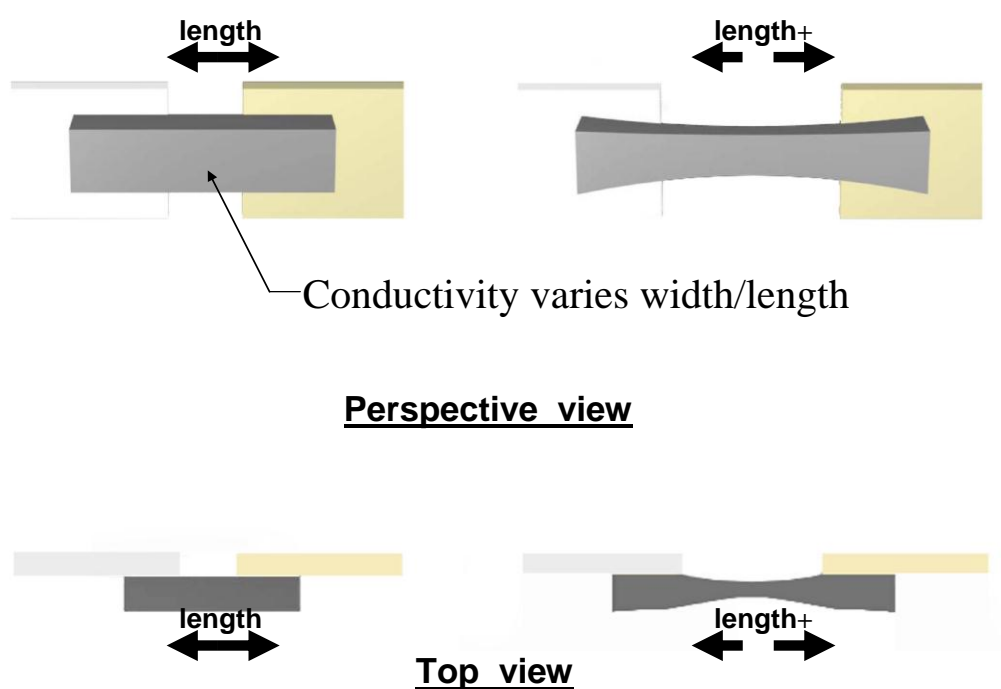
- [1] ASTM Standard D 257-99. Standard test methods for D-C resistance or conductance of insulating materials, 1999.
- [2] ESD STM 11.11-2001 Standard. Surface resistance measurement of static dissipative planar materials, 2001.
- [3] Michael B. Heaney. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, chapter Electrical Conductivity and Resistivity. CRC Press, 1999.
- [4] IEC 61340-5-1 Standard. Electrostatics - part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena - general requirements, 1998.



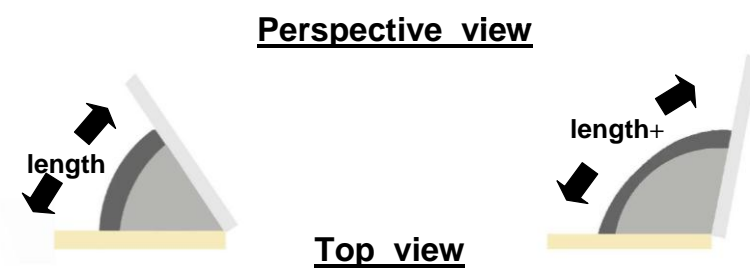
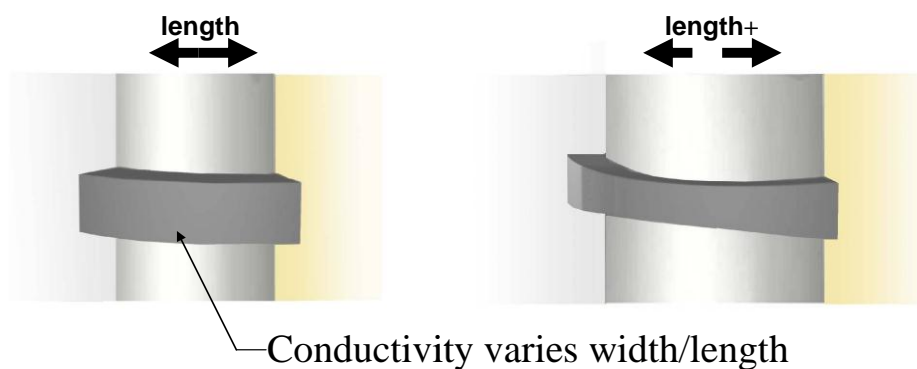
## ภาคผนวก ค

### รูปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การแสดงผลการในการประยุกต์วัสดุเชิงประกอบจากยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็กเพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์ แสดงในรูป ค.1 และ ค.2 โดยหลักการคือ การนำไฟฟ้าของวัสดุซึ่งเกิดจากระยะห่างระหว่างอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงทำให้กระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไป โดยหลักการนี้สามารถใช้ทำเป็นเซ็นเซอร์ ในการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของชิ้นงาน ทั้งที่ทำจากยางธรรมชาติ และชิ้นงานอื่นที่ติดกับวัสดุประกอบจากยางธรรมชาติกับคาร์บอนแบล็ก เช่น ตามข้อต่อ วัสดุกันสะเทือน บานพับปิดเปิด เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในส่วนที่เข้าถึง หรือวัดได้ยาก เช่น ข้อต่อเป็นรูปโค้ง ข้อต่อเครื่องจักรที่มีแผ่นปกคลุมเพื่อความสวยงาม เป็นต้น

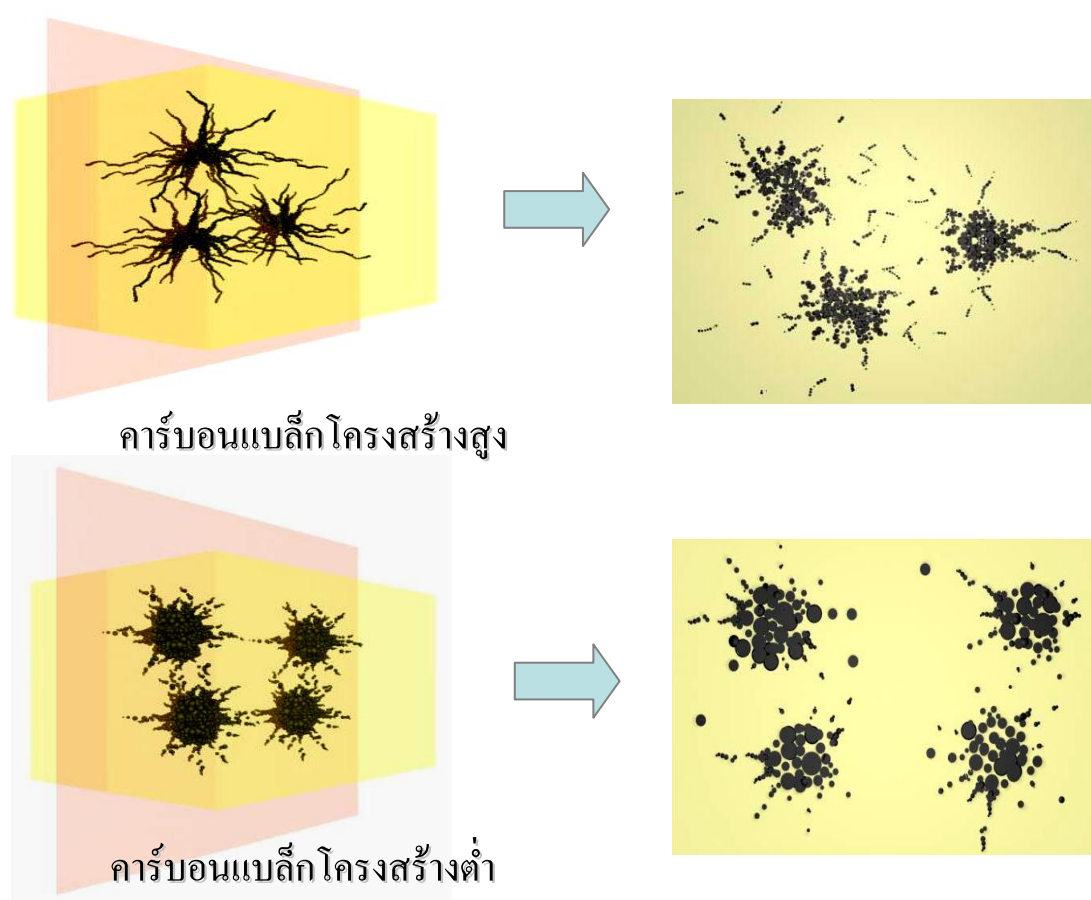


รูปที่ ค.1 แนวคิดในการทำเซ็นเซอร์จากยาง



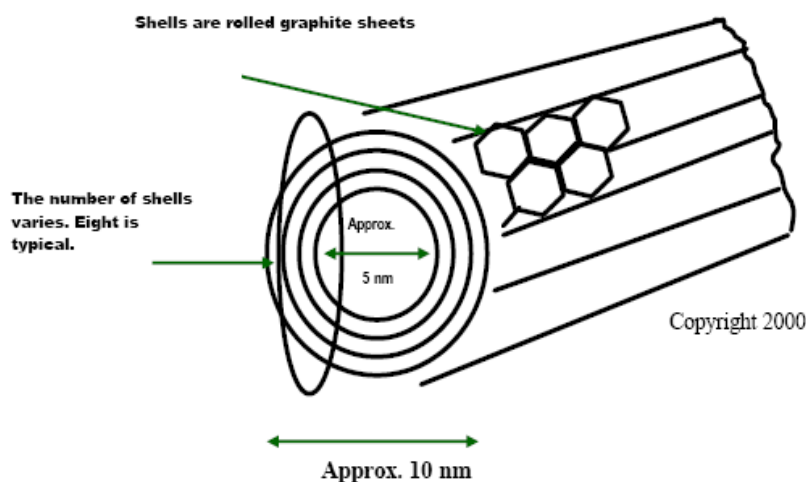
รูปที่ ค.2 แนวทางประยุกต์ทางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นเซ็นเซอร์

รูปที่ ค.3 แสดงการเปรียบเทียบคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงกับคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ โดยคาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงมีลักษณะการเกาะตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็นก้อนและซับซ้อนมากกว่า คาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ นอกจากนี้ คาร์บอนแบล็กโครงสร้างสูงยังมีการกระจายตัวออกจากศูนย์กลางการก่ออนุภาคมากกว่าคาร์บอนแบล็กโครงสร้างต่ำ



รูปที่ ค.3 ชนิดโครงสร้างคาร์บอนแบล็ก

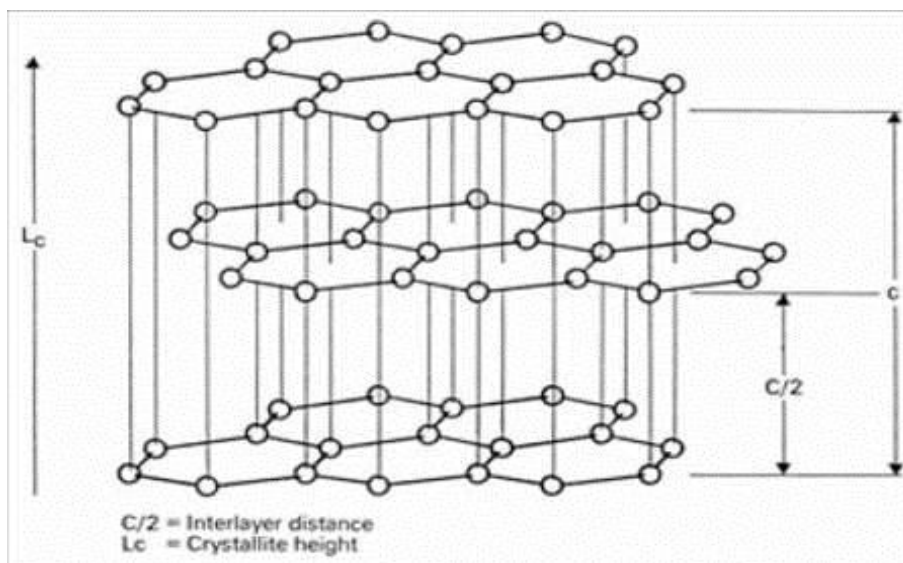
การก่อดัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น แสดงได้จากรูป ค. 4 ซึ่งลักษณะการก่อดัวของแต่ละอนุภาคคาร์บอนแบล็กในโมเลกุลคาร์บอน จะเป็นในลักษณะ 3 มิติ โดยลักษณะของโมเลกุลอนุภาคคาร์บอนแบล็กที่ใหญ่ขึ้น จะมีการก่อดัวเป็นลักษณะร่างแหมากขึ้น ทำให้นอกจากการเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นจากลักษณะก่อดัวเป็นร่างแห ยังเป็นการเพิ่มสมบัตินำไฟฟ้ามากขึ้น จากการส่งผ่านอิเล็กตรอนไฟฟ้าผ่านโครงสร้างร่างแหของโมเลกุลคาร์บอนแบล็ก



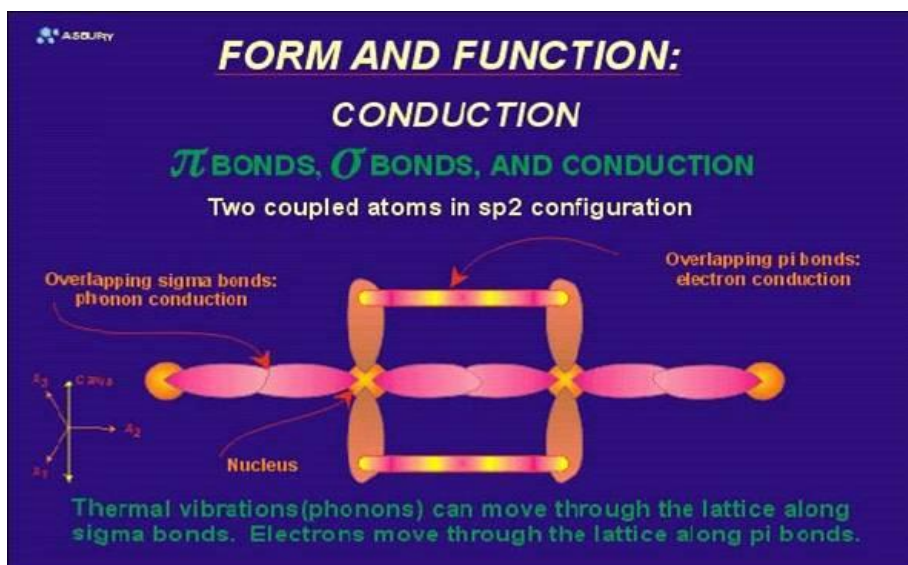
**รูปที่ ค.4** การก่อโมเลกุลคาร์บอนแบล็กเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อน [16]

สมบัติในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กแสดงในรูป ค. 5 เนื่องจากการจัดเรียงตัวของแต่ละอนุภาคคาร์บอนแบล็กในโมเลกุลเป็นแบบ  $sp^3$  ทำให้ในแต่ละอนุภาคคาร์บอนมีอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะเหลือ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้า) ไปยังตำแหน่งต่างๆ ในโมเลกุล ทำให้คาร์บอนแบล็กมีสมบัตินำไฟฟ้า นอกจากนี้โครงสร้างอนุภาคคาร์บอนแบล็ก ยังมีลักษณะคล้ายกราฟต์ซึ่งมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี





(ก)

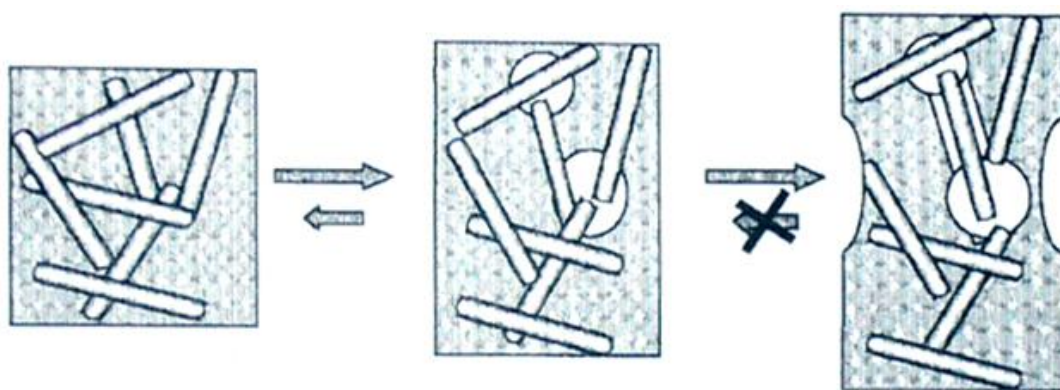


(ข)

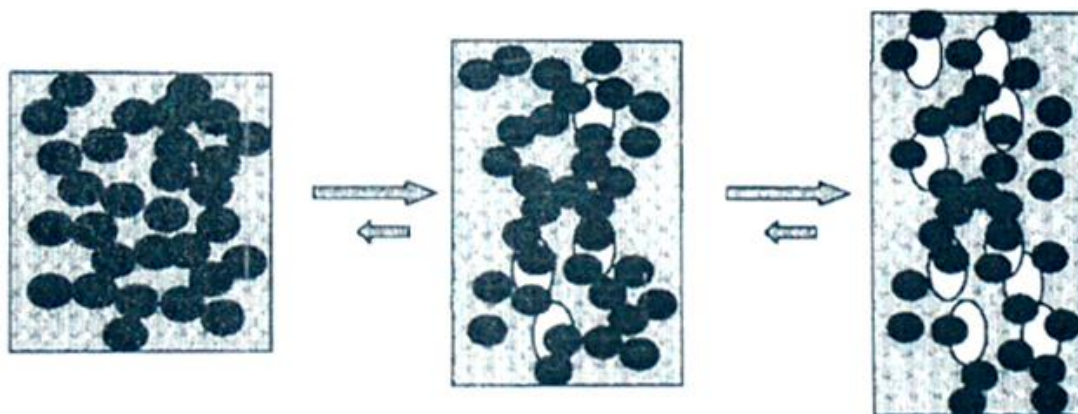
รูปที่ ค.5 ความสามารถในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็กเกิดจาก  $\pi$ -bond ของ คาร์บอนแบล็กในโมเลกุล ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างระนาบของแต่ละโมเลกุล (ก-ข) [16]



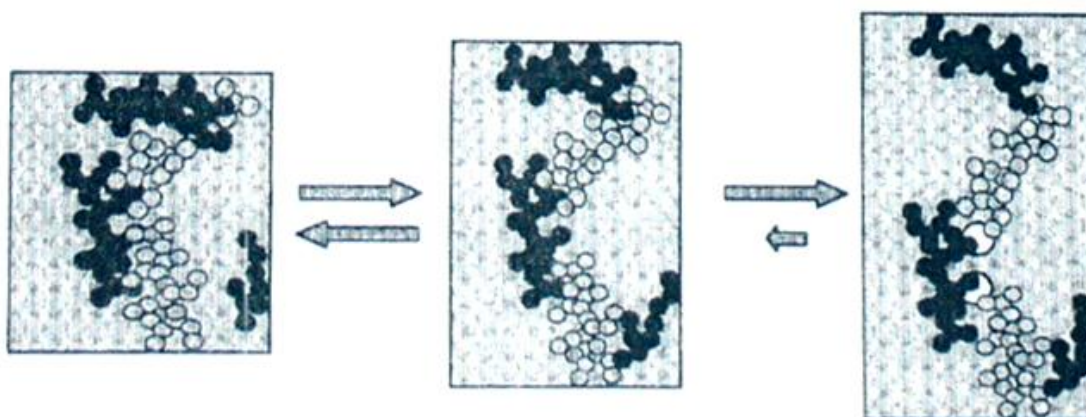
ลักษณะในการนำไฟฟ้าของแต่ละวัสดุเชิงประกอบแสดงในรูป ค. 6 การนำไฟฟ้าที่ต่างกันของแต่ละวัสดุ เกิดจากรูปร่างของวัสดุ ปริมาณวัสดุ และขนาดวัสดุนำไฟฟ้าที่ผสม โดยวัสดุที่มีโครงสร้างต่อเนื่องกันมากจะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุโครงสร้างไม่ต่อเนื่อง ปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความต่อเนื่องของอนุภาคที่ก่อตัวใกล้กันมากขึ้นจากปริมาณวัสดุที่เพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคที่เล็กทำให้มีการเข้ากันในเนื้อวัสดุเชิงประกอบมาก การนำไฟฟ้าจึงสูง นอกจากนี้รูปร่างวัสดุที่ผสมจะส่งผลต่อ การนำไฟฟ้า คือวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใย มีการนำไฟฟ้าดีกว่าวัสดุที่เป็นอนุภาค อีกทั้งสามารถรับแรงได้สูงกว่าวัสดุที่เป็นอนุภาคที่ระดับการยึดตัวหนึ่ง เมื่อการยึดตัวเพิ่มขึ้นจากนี้ วัสดุเชิงประกอบจากเส้นใยจะเสียสภาพได้ง่ายกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เป็นอนุภาค



(ก)



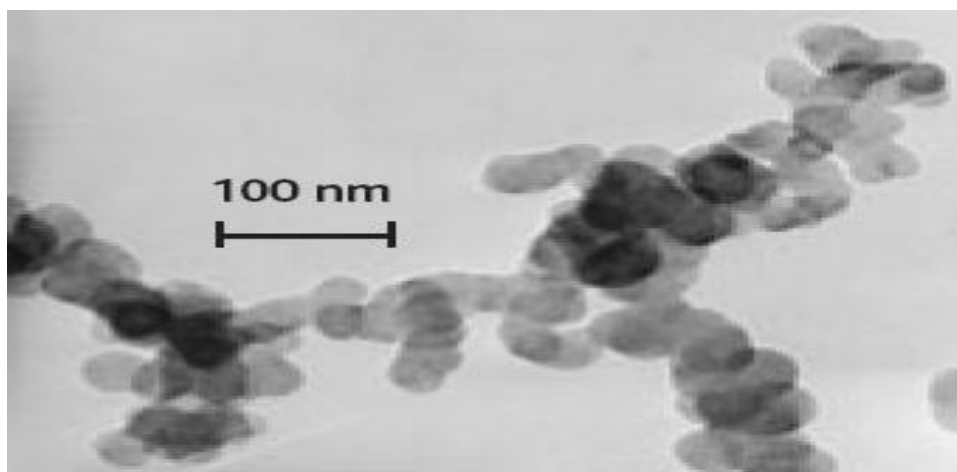
(ข)



(ค)

รูปที่ ค.6 รูปแสดงแต่ละวัสดุเชิงประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

รูป ค. 7 แสดงการจัดเรียงตัวของอนุภาคคาร์บอนแบล็กเป็นโมเลกุลที่มีโครงสร้างซับซ้อนมากขึ้น โดยคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างสูงจะมีการก่อตัวของแต่ละอนุภาคคาร์บอนเป็นโมเลกุลที่มีกิ่งก้าน และโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าคาร์บอนแบล็กที่มีโครงสร้างต่ำ



TEM picture of ENSACO™ Carbon Black showing the high level of aggregation.  
By courtesy of University of Louvain (Louvain-La-Neuve)

รูปที่ ค.7 รูปแสดงโครงสร้างการรวมตัวกันของคาร์บอนแบล็ก [17]