

การพัฒนาสมบัติเชิงกลของชั้นวัสดุซ่อมแซมตัวเองของถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้  
โดยการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

Improvement of Mechanical Properties of Self-sealing Material of Self-sealing Fuel Tank  
by Adding Nanocellulose Fiber

ญาณสรณ์ กนิษฐสังกัส<sup>1</sup>, เสฏฐวุฒิ สรสุวรรณ<sup>1</sup>, เอกวัฒน์ ปานมี<sup>1</sup> และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE) วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>3</sup>ศูนย์วิจัยการออกแบบและวิศวกรรมสำหรับระบบรางและระบบการขนส่งสมัยใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: siriorn.i@cit.kmutnb.ac.th

Yanasorn Kanithasungkas<sup>1</sup>, Sedtawut Sornsuwan<sup>1</sup>, Aegwat Panmee<sup>1</sup> and

Siriorn Isarankura Na Ayutthaya<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>2</sup>Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy (CTAE),

College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

<sup>3</sup>Center for Design and Engineering for Railway and Modern Transport System,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok

E-mail: siriorn.i@cit.kmutnb.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงของยางธรรมชาติ โดยใช้สารเสริมแรงเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลส และผสมลงในยางธรรมชาติที่ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 phr เพื่อทำเป็นวัสดุกันรั่วของถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้ งานวิจัยนี้ศึกษาหาปริมาณรูปพรุน สมบัติเชิงกล (ทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน) และอัตราการบวมตัวของยาง กระบวนการเตรียมชิ้นงานทำได้โดยผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับน้ำกลั่น จากนั้นทำให้เส้นใยกระจายตัวด้วยเครื่องผสมสารความถี่สูง นำมาผสมกับน้ำยางลาเท็กซ์ด้วยเครื่องกวนสารละลาย และอบที่อุณหภูมิ

Research Paper

\*Corresponding author

Received 1 May 2021

Revised 21 November 2021

Accepted 29 November 2021

70 องศาเซลเซียส นาน 12 ชม. นำยางผสมเส้นใยดังกล่าวมาผสมกับยางธรรมชาติและสารเติมแต่ง ด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง จากนั้นหาค่าระยะเวลาการคงรูปของยาง ( $t_{c90}$ ) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้วที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำค่าที่ได้มาใช้ในการคงรูปยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน จากนั้นศึกษาสัณฐานวิทยา ได้แก่ วิเคราะห์หาปริมาณรูพรุน และการกระจายตัวของเส้นใย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบสมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ในขณะที่เดียวกันนำยางสูตรต่าง ๆ ไปหาอัตราการบวมตัวในน้ำมันเบนซินที่เวลาต่าง ๆ ผลการทดลองสรุปว่า สูตรที่มีการผสมเส้นใยลงในยางธรรมชาติที่ 2 phr เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด เพราะมีอัตราการบวมตัวเร็วที่สุดเมื่อสัมผัสกับน้ำมันเบนซิน และมีความแข็งแรงมากกว่าสูตรที่ไม่เติมเส้นใย ทั้งก่อนและหลังบวมตัวในน้ำมันเบนซิน

**คำสำคัญ:** นาโนเซลลูโลส; ยางธรรมชาติ; วัสดุซ่อมแซมตัวเองได้; การบวมตัวในน้ำมัน

#### **Abstract**

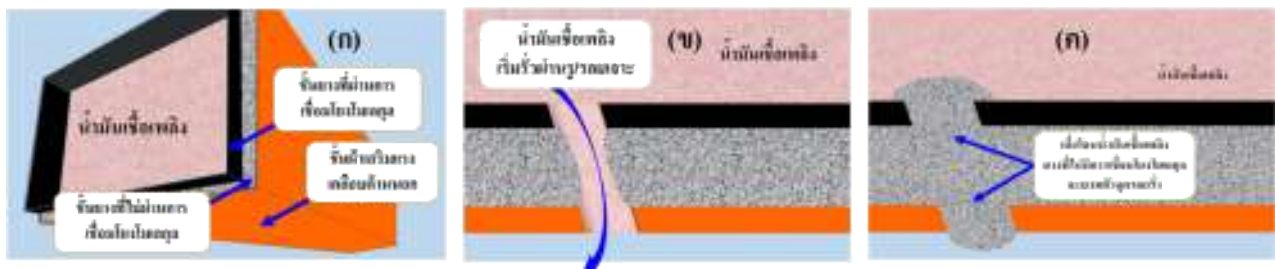
This research concerns the improvement of the strength of natural rubber. The nanocellulose fiber were used as reinforcement in natural rubber at 0, 2, 4, 6, 8 and 10 phr, which can be used as a self-sealing material of the self-sealing fuel tanks. This research studied the porosity content, mechanical properties (before and after gasoline uptake) and the rate of rubber swelling. Preparation process, the nanocellulose fiber and distilled water were mixed, and the fiber was dispersed by using a high frequency ultrasonic probe. Afterwards, the fiber solutions and the natural rubber latex were mixed by using a magnetic stirrer and dried in an oven at 70 °C for 12 h. Then, the masterbatches of the fiber/rubber were blended with the natural rubber and the additives using a two-roll mill machine. Afterward, the compounds were measured the curing time ( $t_{c90}$ ) using the oscillating rheometer at 150 degree celsius. The compounds were fabricated to be the samples in a sheet form, using the hot-press compression molding machine. Subsequently, the samples were studied the morphology, including the porosity content and the fiber distribution by using the scanning electron microscopy. The mechanical properties were tested by using the universal testing machine. Meanwhile, the samples were immersed into the gasoline. The rate of rubber swelling at various times were investigated. The results conclude that the rubber sheet with 2 phr of the nanocellulose fiber is the optimum formula. It was due to this formula stronger than the neat rubber, before and after gasoline uptake. Furthermore, it also has the highest rate of swelling.

**Keywords:** Nanocellulose; Natural rubber; Self-sealing material; Fuel swelling.

## 1. บทนำ

การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานนั้น มีทั้งการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัย ระหว่างการบินของอากาศยาน [1] หนึ่งในส่วนสำคัญของชิ้นส่วนอากาศยานที่มีความเสี่ยงต่อความปลอดภัยเป็นอย่างมากคือถังน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะเป็นส่วนที่มีความไวต่อการติดไฟและการระเบิด ด้วยเหตุนี้ จึงมีงานวิจัย และสิทธิบัตรจำนวนมากทำการพัฒนาถังน้ำมันเชื้อเพลิงให้มีความปลอดภัยมากขึ้น ซึ่งหนึ่งในการพัฒนา ได้แก่ การสร้างถังน้ำมันเชื้อเพลิงซ่อมแซมตัวเองได้ หรือ “Self-sealing fuel tank” [1-3]

ถังน้ำมันเชื้อเพลิงซ่อมแซมตัวเองได้ เริ่มผลิตขึ้นในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 และสงครามเกาหลี เพื่อใช้ในอากาศยานทางการทหาร [1, 4] โดยใช้หลักการบวมตัวของวัสดุเมื่อสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง กล่าวคือ เมื่อวัสดุ นั้นสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิงจะเกิดการบวมตัวมาอุดรอยรั่วของถังน้ำมัน เมื่อเครื่องบินรบถูกยิงทะลุถึงถังน้ำมัน ชิ้น วัสดุดังกล่าวจะเกิดการบวมตัว และปิดรอยรั่วจากการถูกยิงได้ [1] โดยรูปที่ 1-ก แสดงหลักการทำงานของถัง น้ำมันเชื้อเพลิงซ่อมแซมตัวเองได้ โดยเมื่อถังเกิดรอยรั่วหรือถูกเจาะทะลุ (รูปที่ 1-ข) น้ำมันเชื้อเพลิงจะสัมผัสกับ ชิ้นยางที่ไม่มีสารเชื่อมโยงโมเลกุล ทำให้ยางบวมตัวและปิดรอยรั่วได้ (รูปที่ 1-ค) ทำให้ช่วยลดการสูญเสีย น้ำมัน เชื้อเพลิง และเพิ่มโอกาสในการนำเครื่องบินลงจอดได้อย่างปลอดภัย [1, 3]



รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างและหลักการทำงานของถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้ (ก)

น้ำมันเชื้อเพลิงไหลผ่านรูรั่วของถังน้ำมัน (ข) และ ยางสัมผัสน้ำมันเชื้อเพลิงจนบวมตัวปิดรูรั่ว (ค) [5]

ถังน้ำมันที่ซ่อมแซมตัวเองได้นั้น จะต้องบวมตัวได้ดีเมื่อสัมผัสกับน้ำมันเชื้อเพลิง และจะต้องไม่ละลาย ในน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น อีกทั้งยังต้องมีความเหนียว แข็งแรง และทนต่อการฉีกขาด [1] ด้วยเหตุนี้ เพื่อตอบสนองต่อ ความต้องการข้างต้น ถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้ส่วนใหญ่ จึงประกอบไปด้วยชั้นวัสดุหลัก คือ ชั้นของแผ่นยาง และผ้าเสริมแรง ซึ่งชั้นที่ติดกับตัวถังคือชั้นยางที่ผ่านการคงรูป (vulcanized rubber) ชั้นถัดมาเป็นชั้นของยางที่ไม่ มีการคงรูป (unvulcanized rubber) และชั้นนอกสุดเป็นชั้นผ้าเสริมแรง (reinforced fabric) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1-ก [4, 6] ถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้ มักใช้กับเครื่องบินขนาดเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ลูกสูบ ซึ่งใช้น้ำมันเบนซินเป็น เชื้อเพลิง ดังนั้นชั้นวัสดุซ่อมแซมตัวเองของถังน้ำมันดังกล่าว จะต้องทำจากวัสดุที่บวมตัวได้ดีเมื่อสัมผัสกับน้ำมัน เบนซิน และยังคงบวมตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำเพราะเครื่องบินที่เพดานบินที่สูงซึ่งมีอากาศเย็นจัด ซึ่งวัสดุที่ บวมตัวในน้ำมันเบนซินได้ดีที่อากาศเย็นจัด คือ ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) [4] แต่หากภูมิประเทศของ

ประเทศนั้นไม่สามารถผลิตยางธรรมชาติได้ ก็สามารถใช้อย่างสังเคราะห์ที่ราคาแพงกว่าได้ เช่น ยางพอลิบิวตะไดอิน และยางไอโซพรีนโอโซพรีน เป็นต้น [1, 6] แม้ว่าอย่างดังกล่าวจะมีอัตราการบวมตัวที่ช้ากว่าและใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดีไม่เท่ากับยางธรรมชาติก็ตาม [4, 5-6]

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น หากวัสดุดังกล่าวไม่มีการเชื่อมโยงโมเลกุลเลย อาจมีความแข็งแรงไม่เพียงพอขณะบวมตัวก็อาจทำให้ชิ้นส่วนยางส่วนนั้นขาดออกและหลุดเข้าไปในระบบจ่ายน้ำมัน ทำให้ฟิลเตอร์และท่อส่งน้ำมันเกิดการอุดตัน จนกระทั่งน้ำมันไม่สามารถส่งไปยังเครื่องยนต์ได้ ส่งผลให้เครื่องยนต์ดับกลางอากาศ ซึ่งอาจกลายเป็นปัญหาที่ร้ายแรงมากตามมาได้ ดังนั้น ชิ้นยางซ่อมแซมตัวเองได้ จึงควรมีความแข็งแรงขณะบวมตัวอย่างเพียงพอที่จะไม่ขาดและหลุดเข้าสู่ท่อและตัวกรองของระบบน้ำมันเชื้อเพลิงได้ง่าย งานวิจัยก่อนหน้านี้ จึงได้ทำการปรับปรุงความแข็งแรงของยางและศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการดูดซับและการบวมตัวของยางธรรมชาติในสารอินทรีย์ รวมถึงน้ำมันเบนซิน ซึ่งพบว่าความแข็งแรงและความสามารถในการดูดซับและการบวมตัวของยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลและปริมาณรูพรุนของยาง [5-10]

แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่างานวิจัยดังกล่าวจะได้สูตรยางธรรมชาติที่มีปริมาณสารเชื่อมโยงโมเลกุลและปริมาณสารทำให้เกิดฟองที่เหมาะสมแล้ว แต่ก็ยังพบว่าค่าความแข็งแรงหลังการบวมตัวยังคงควรที่จะมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นอีก [5, 11-12] ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุยางธรรมชาติทั้งก่อนและหลังการบวมตัวด้วยน้ำมันเบนซิน โดยการเติมสารเสริมแรงลงไปในยางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของถังน้ำมันแบบซ่อมแซมตัวเองได้

โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลส (nano-cellulose) เป็นสารเสริมแรงให้กับยางธรรมชาติ [13-18] ซึ่งเส้นใยนี้มีข้อดีคือ มีขนาดเล็กมีความอ่อนตัว โดยขนาดของเส้นใยจัดอยู่ในระดับนาโนเมตร และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูง (high aspect ratio) ซึ่งคาดว่าน่าจะสามารถกระจายตัวไปในเนื้อเมทริกซ์ที่มีลักษณะเป็นรูพรุนได้ดี สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับส่วนที่เป็นเมทริกซ์ได้ นอกจากนี้ เนื่องจากเส้นใยดังกล่าวเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก และมีความอ่อนตัว หากเกิดการหลุดเข้าไปในระบบการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง ก็ไม่น่าจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบดังกล่าวได้เพราะเส้นใยมีขนาดเล็ก อ่อนตัวมาก และยังสามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งดีกว่าสารเสริมแรงชนิดอื่น ที่มักจะเป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งแรงและทนต่ออุณหภูมิสูง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เคลย์ และซิลิกา เป็นต้น [15, 19]

## 2. วิธีการวิจัย

### 2.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 2.1.1 วัสดุและสารเคมี

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ยางลาเท็กซ์ (ชนิด HA60% DRC) จาก บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ยางธรรมชาติ (เกรด STR 5L) แบบยางก้อน กรดสเตียริก (Stearic acid) สารซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สารโทลูอินซัลโฟนิลไฮไดรไรด์ (Toluenesulfonyl hydrazide) สารไดเบนโซโทอะซิลไดซัลไฟด์

(Dibenzothiazyl disulfide; MBTS) สารเตตระเมทิลไรบูเรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethylthiuram monosulfide, TMTM) สารซัลเฟอร์ (Sulphur) สารไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลดีนไดเอมีน (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine; 6PPD) สารข้างต้นได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เคมี อินโนเวชั่น จำกัด เส้นใยนาโนเซลลูโลส (Nanofibrillated cellulose, NC) เตรียมได้จากเส้นใยเกรด Celish-KY 100S (23-27%โดยน้ำหนัก ในน้ำ) จากบริษัท Daicel Finechem จำกัด (โตเกียว ประเทศญี่ปุ่น) น้ำมันเบนซิน จากบริษัท เชลล์แห่งประเทศไทย จำกัด

### 2.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องกวนสารละลาย (ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS10) เครื่องผสมสารความถี่สูง (Ultrasonic processor ยี่ห้อ Cole Parmer รุ่น MODEL CV334) ตู้อบความร้อน (ยี่ห้อ Memmert รุ่น UN750plus) เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (ยี่ห้อ Charentut รุ่น D6L12-HT-INV ประเทศไทย) เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน (ยี่ห้อ Cometech รุ่น G6010-01-024 ใต้หวัน) เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึงยืดออกประตงค์ (ยี่ห้อ Testometric รุ่น M500-25AT ประเทศอังกฤษ) เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Moving die rheometer, MDR) (ยี่ห้อ Ektron รุ่น EKT-2000s ใต้หวัน) กล้องจุลทรรศน์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ยี่ห้อ Nikon รุ่น SMZ800 ประเทศญี่ปุ่น) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล สามตำแหน่ง (รุ่น ML204 บริษัท Mettler Toledo, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analyzer) ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น: TGA/DSC3+ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1450 VP

## 2.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายยางผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

### 2.2.1 การเตรียมสารละลายนาโนเซลลูโลส

นำเส้นใยนาโนเซลลูโลสเกรด Celish-KY 100S (23-27%โดยน้ำหนัก ในน้ำ) มาทำการผสมกับน้ำกลั่น ด้วยเครื่องกวนสารละลาย ในอัตราส่วนเส้นใย:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:100 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องผสมสารความถี่สูง ที่ความถี่ 100 เฮิรตซ์ แอมพลิจูด 40 จูล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เส้นใยเซลลูโลสแตกตัวจาก microfibrillate เป็น nanofibrillated โดยระหว่างผสมต้องควบคุมอุณหภูมิสารไม่ให้มีความร้อนมากเกินไป โดยนำน้ำแข็งมาหล่อเย็นรอบบีกเกอร์ที่ใส่สารผสมดังกล่าว จากนั้นจะได้สารผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสแขวนลอยกระจายตัวอยู่ในน้ำกลั่น หากไม่นำมาใช้ทันทีให้เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

### 2.2.2 การเตรียมยางแผ่นอบแห้งผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

นำสารผสมนาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้จากข้อ 2.2.1 มาผสมกับน้ำยางธรรมชาติชนิด HA60% DRC ในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดเชื้อราที่ขึ้นงาน จากนั้นจะได้ยางแผ่นผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

## 2.3 ขั้นตอนการเตรียมยางคอมปาวด์

ผสมสารเติมแต่งและยางแผ่นผสมนาโนเซลลูโลส (จากข้อ 2.2.2) ลงในยางก้อนธรรมชาติเกรด STR 5L ด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 4 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการผสมแต่ละสูตรเท่ากับ 24 นาที แต่ละสูตรจะเติมสารเติมแต่งในปริมาณเท่ากันทุกสูตร โดยปริมาณส่วนผสมของยางธรรมชาติ สารเติมแต่ง และเส้นใยนาโนเซลลูโลสในยางธรรมชาติ แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณยางธรรมชาติ สารเติมแต่ง และเส้นใยนาโนเซลลูโลส ที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณที่ใช้ (phr)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	100
สารกระตุ้นปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (ZnO)	4
สารกระตุ้นตัวเร่ง (stearic acid)	2
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (6PPD)	1
สารทำให้เกิดฟอง (sulfonyl hydrazide)	12
สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (MBTS)	2.5
สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (TMTM)	1
สารเชื่อมโยงโมเลกุล (sulfur)	0.5
เส้นใยนาโนเซลลูโลส	0, 2, 4, 6, 8, 10

## 2.4 ขั้นตอนการคงรูปยาง

### 2.4.1 การหาระยะเวลาการคงรูปของยาง

นำยางคอมปาวด์แต่ละสูตรในตารางที่ 1 มาทำการหาค่าระยะเวลาการคงรูปของยาง ( $t_{c90}$ ) และค่าแรงบิดสูงสุด โดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแก้ว ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

### 2.4.2 การคงรูปยาง

นำยางคอมปาวด์ที่ได้ มาทำการคงรูปให้เป็นแผ่นชิ้นงาน ขนาด 15x15x2 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบกดอัดด้วยความร้อน โดยขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แรงดันในการกดอัดเท่ากับ 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปจากตารางที่ 2

## 2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์และทดสอบ

### 2.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย และเส้นใยผสมยางธรรมชาติ

นำยางที่ผ่านการคงรูปมาตัดขวางเป็นชิ้นที่มีความยาวประมาณ 1 เซนติเมตร จำนวนสูตรละ 3 ชิ้น และนำเส้นใยที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 2.2.1 มาทำให้แห้ง จากนั้นนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมด secondary electron (SE) เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาทั้งของเส้นใยและชิ้นงานยางสูตรต่าง ๆ และคำนวณหาสัดส่วนและการกระจายตัวของรูพรุนในเนื้อยาง โดยนำภาพของชิ้นงานยางผสมนาโนเซลลูโลสสูตรต่าง ๆ มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อหาค่าร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนและวัดขนาดรูพรุน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาความหนาแน่นของการกระจายตัวของรูพรุนแต่ละขนาด ด้วยโปรแกรม OriginPro2021b โดยใช้

ฟังก์ชัน Gaussian นอกจากนี้ ยังทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของเส้นใยในเนื้อเยื่อด้วยการใช้เทคนิคการถ่ายภาพโหมด SEM-EDX scan mapping เพื่อดูการกระจายตัวของออกซิเจนซึ่งเป็นตัวแทนของเส้นใยในเนื้อเยื่อ

### 2.5.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำชิ้นงานที่ได้มาเตรียมให้เป็นรูปดัมเบลล์ให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 638 สูตรละ 5 ชิ้นงาน นำมาหาค่าการทนต่อต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยึดอเนกประสงค์ ความเร็วที่ใช้ในการดึงชิ้นงานคือ 500 มิลลิเมตร/นาที และใช้หัววัดขนาด 100 กิโลกรัมแรง (Kgf) การทดสอบแรงดึงประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วมาทำการทดสอบได้ทันที ส่วนที่สอง นำชิ้นงานที่บวมตัวแล้ว (หลังจากแช่ในน้ำมันเบนซิน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) มาทำการดึงทดสอบเพื่อหาค่าเพื่อหาค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของชิ้นงาน

### 2.5.3 การหาร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมันเบนซิน

การหาร้อยละการบวมตัวของยางในน้ำมันเบนซิน สามารถคำนวณ ได้ตามสูตร 2.1

$$Q_t = \left( \frac{\left( \frac{W_t - W_o}{W_o} \right) \times 100}{M_w} \right) \quad (1)$$

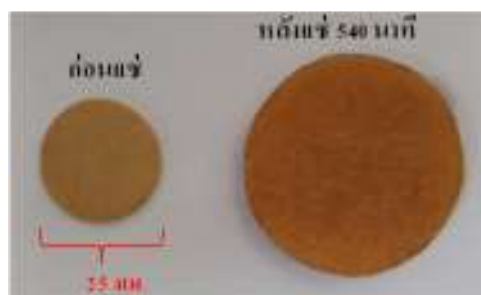
โดย  $Q_t$  คือ ร้อยละการบวมตัว

$W_t$  คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

$W_o$  คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

$M_w$  คือ มวลโมเลกุลของน้ำมันเบนซิน (114.23 กรัมต่อโมล)

นำยางที่ผ่านการคงรูปแต่ละสูตร มากดตัดให้เป็นรูปวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร (รูปที่ 2) จำนวนสูตรละ 3 ชิ้น จากนั้นชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง โดยชั่งน้ำหนักยางก่อนแช่ในน้ำมันเบนซิน จากนั้น นำยางสูตรต่าง ๆ มาแช่ลงในขวดแก้วบรรจุน้ำมันเบนซินที่มีฝาปิดสนิทและแช่ไว้เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดย 3 ชั่วโมงแรกจะนำยางออกมาชั่งน้ำหนักทุก 15 นาที หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุก 30 นาที จนครบ 9 ชั่วโมง (หรือ 540 นาที) โดยลักษณะของยางก่อนและหลังแช่ในน้ำมันเบนซิน แสดงไว้ในรูปที่ 2

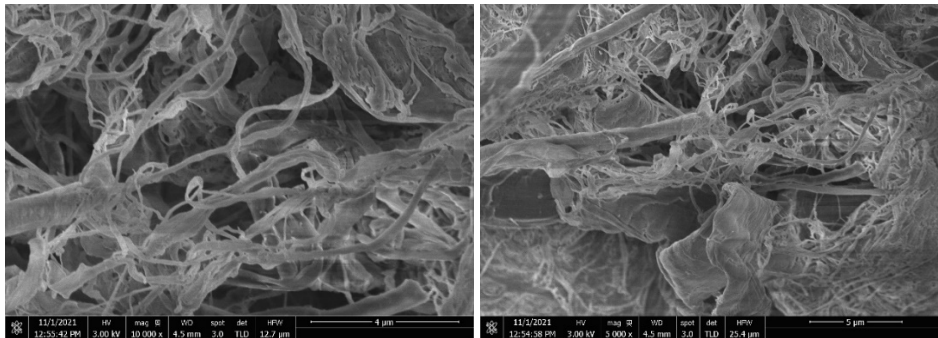


รูปที่ 2 เปรียบเทียบขนาดยาง ก่อนและหลังการบวมตัวหลังจากแช่ในน้ำมันเบนซิน นาน 540 นาที

### 3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 3.1 สัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนเซลลูโลส

รูปที่ 3 แสดงลักษณะของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เตรียมได้จากหัวข้อ 2.2.1 จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยนาโนเซลลูโลส Celish KY-100S ที่เตรียมได้นั้นมีความยาวมาก และมีการแตกตัวดี มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อยู่ในช่วงตั้งแต่ 30 – 400 นาโนเมตร เส้นใยส่วนมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 100 – 200 นาโนเมตร แต่ก็มีเส้นใยบางส่วนเกาะกลุ่มเป็นเส้นใยขนาดใหญ่ 250 – 500 นาโนเมตร ปะปนอยู่บ้าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [20-25]



รูปที่ 3 ภาพถ่ายเส้นใยนาโนเซลลูโลส Celish KY-100S จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 3.2 ระยะเวลาการคงรูปและค่าแรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

ตารางที่ 2 แสดงระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูป ( $tc_{90}$ ) และค่าแรงบิดสูงสุดของชิ้นงานยางธรรมชาติที่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ค่าระยะเวลาการคงรูป ( $tc_{90}$ ) และค่าแรงบิดสูงสุดของยางแต่ละสูตร

สูตร	ปริมาณ NC* (phr)	ค่า $tc_{90}$ (นาท)	ค่าแรงบิดสูงสุด (Ibf.in)
Pure NR	0	41.18	1.82
NC2	2	38.11	1.61
NC4	4	36.05	1.95
NC6	6	38.05	1.68
NC8	8	38.54	2.25
NC10	10	40.30	2.82

\*ปริมาณ NC คือ ปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลส

จากข้อมูลดังกล่าว พบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 36 – 41 นาท ที่เป็นเช่นนี้เพราะทุกสูตรมีการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้ อีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ปริมาณ 2 – 10 phr ลงในยางธรรมชาติไม่ได้ส่งผลต่อระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ



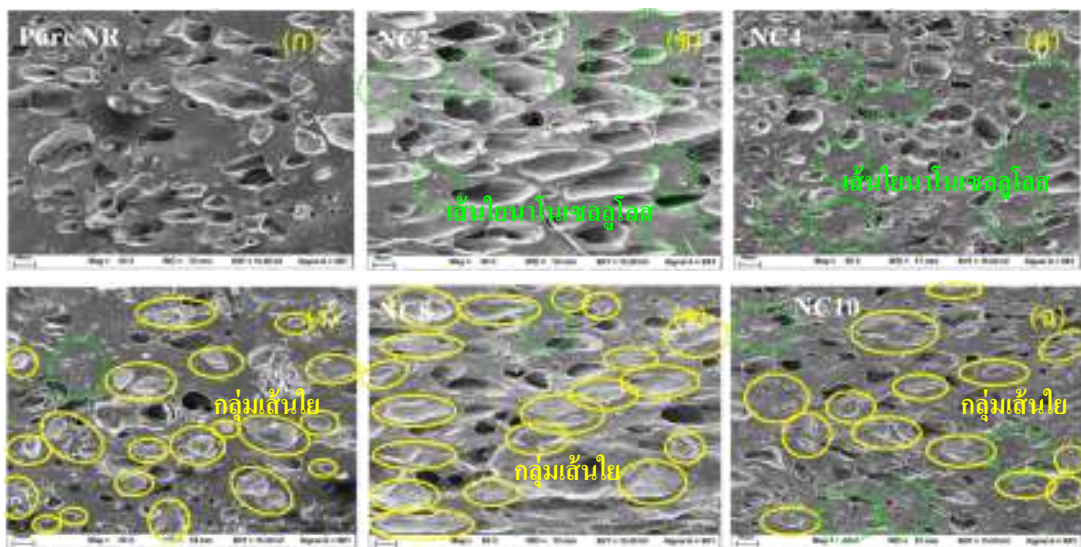
เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดสูงสุดของชิ้นงานยางธรรมชาติที่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสปริมาณต่าง ๆ จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าค่าแรงบิดสูงสุดของชิ้นงานที่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ปริมาณ 0, 2, 4 และ 6 phr จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หากเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสมากขึ้น ที่ปริมาณ 8 และ 10 phr พบว่าค่าแรงบิดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณารูปที่ 4 และ 5 พบว่ายางสูตร NC6 เริ่มพบการเกาะกลุ่มของเส้นใยขนาดใหญ่และมีการกระจายอยู่ในชิ้นงานบ้าง (วงกลมเส้นทึบในรูปที่ 4-ง) แต่ในส่วนของยางสูตร NC8 และ NC10 พบว่าเส้นใยที่เกาะกลุ่มกัน มีขนาดใหญ่ขึ้น มีจำนวนมากขึ้น และกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน (รูปที่ 4-จ และ 4-ฉ) ซึ่งสอดคล้องกับค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสในปริมาณมากขึ้น โดยค่าแรงบิดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลของเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห Zn-Cellulose complex network เพิ่มขึ้น นอกเหนือจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงโมเลกุลของยางธรรมชาติเอง ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นขณะให้ความร้อนเพื่อคงรูปชิ้นงาน [15]

### 3.3 ลักษณะทางกายภาพ สัดส่วนรูพรุน ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของเส้นใยในชิ้นงานยางธรรมชาติ

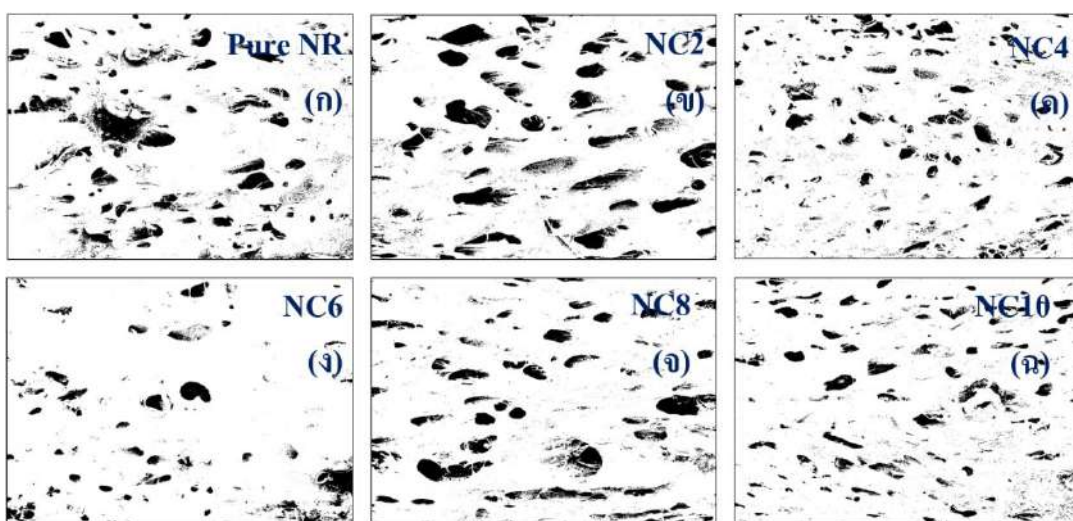
รูปที่ 4 แสดงภาพถ่าย SEM ของหน้าตัดขวางของชิ้นงานยางสูตร Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 ซึ่งแสดงถึงลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน ส่วนรูปที่ 5 แสดงถึงบริเวณพื้นที่รูพรุนที่ได้จากการปรับภาพผ่านโปรแกรม ImageJ เพื่อให้เห็นพื้นที่รูพรุนได้ชัดเจนขึ้น และรูปที่ 6 คือภาพถ่าย SEM ของชิ้นงาน โดยถ่ายด้วยโหมด EDX-Scan mapping เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของออกซิเจนที่เป็นตัวแทนของสารซิงค์ออกไซด์ สาร sulfonyl hydrazide และเส้นใยนาโนเซลลูโลสในชิ้นงานยาง ทั้งนี้ ชิ้นงานยางทุกสูตรจะมีการเติมสารซิงค์ออกไซด์และในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นออกซิเจนที่กระจายตัวในชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นออกซิเจนที่มาจากส่วนที่เป็นของเส้นใยนาโนเซลลูโลส ซึ่งช่วยใช้ประกอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของเส้นใยนาโนเซลลูโลสในเนื้อยาง รูปที่ 7 แสดงกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในชิ้นงาน Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OriginPro2021b และรูปที่ 8 แสดงกราฟแนวโน้มร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนและขนาดรูพรุนของชิ้นงานยางทุกสูตร

เมื่อพิจารณาชิ้นงานยาง Pure NR จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่าบริเวณเนื้อยางมีความเรียบสม่ำเสมอ [15] และมีการกระจายตัวของรูพรุนอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน โดยมีร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนเท่ากับ  $9.73 \pm 3.17$  ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ  $83.23 \pm 2.42$  ไมครอน จากนั้นเมื่อพิจารณาชิ้นงาน NC2 พบว่ามีเส้นใยมีการกระจายตัวในเนื้อยางและมีปริมาณร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยรูพรุนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เติมลงไป ในปริมาณ 2 phr นั้น มีการกระจายตัวในเฟสเมทริกซ์ของยางได้ไม่ดึ๊ง เส้นใยบางส่วนรวมตัวกันหนาแน่น แต่บางส่วนไม่หนาแน่น (รูปที่ 4 และ 6) จึงทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นขณะทำการขึ้นรูปไม่สามารถแทรกตัวไปในส่วนที่มีเส้นใยหนาแน่นมากได้ ฟองแก๊สดังกล่าวจึงเคลื่อนที่มารวมตัวกันในบริเวณที่มีเส้นใยหนาแน่นน้อยกว่า เพราะมีความหนืดน้อยกว่า (รูปที่ 6-ข) เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงาน Pure NR (ยางสูตร Pure NR ไม่มีการเติมเส้นใย จึงทำให้มีความหนาแน่นหรือความหนืดภายในชิ้นงานใกล้เคียงกันทั้งหมด)

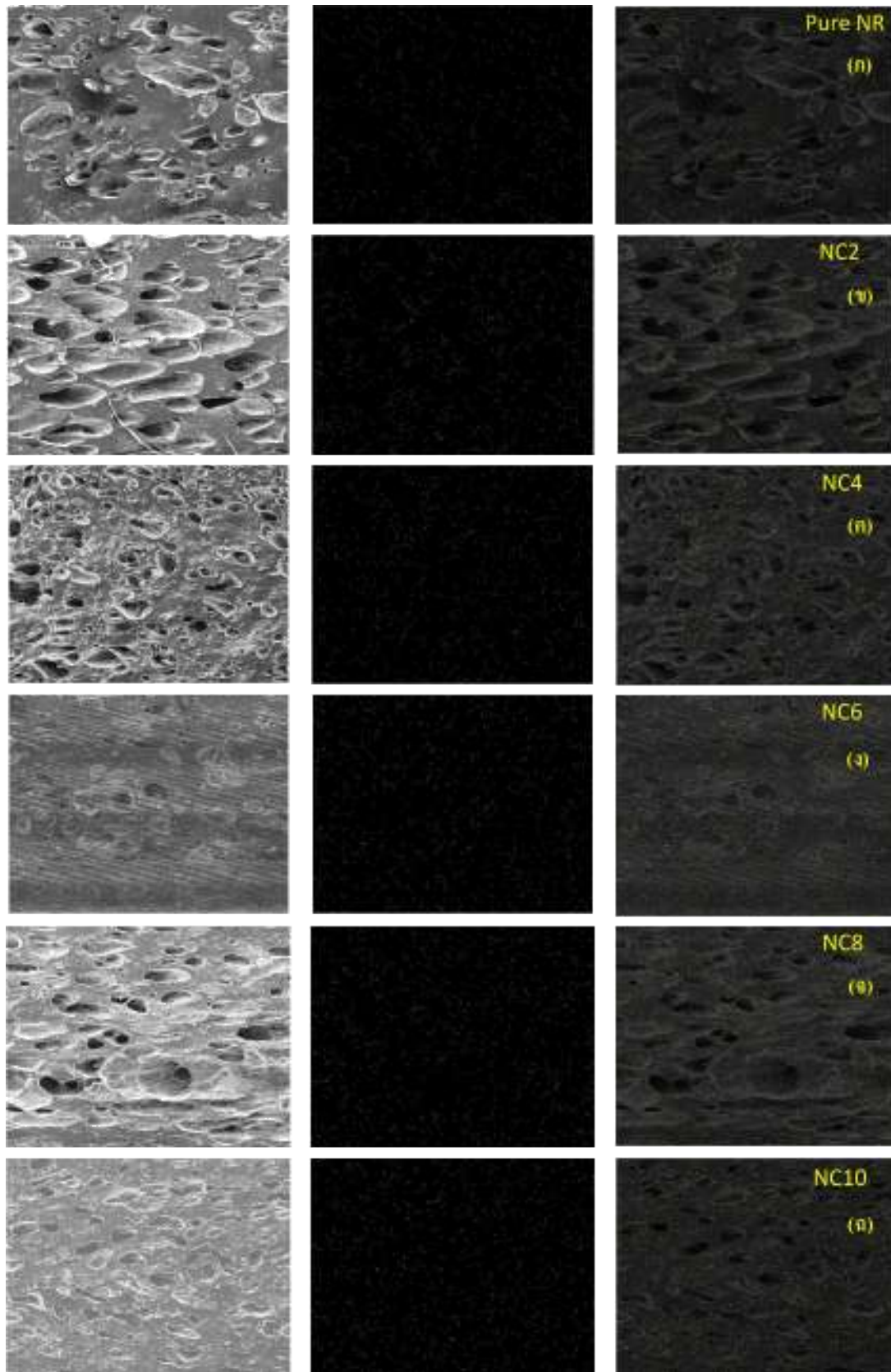
จากรูปที่ 4 – 8 เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานสูตร NC4 เทียบกับ NC2 พบว่ายางสูตร NC4 มีค่าร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนน้อยกว่ายางสูตร NC2 และขนาดรูพรุนในชิ้นงาน NC4 ก็มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นในสูตร NC2 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4 และ 6 พบว่าการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสในปริมาณ 4 phr นั้น เส้นใยมีการกระจายตัวในเฟสเมทริกซ์ที่ดีและสม่ำเสมอ อีกทั้งมีปริมาณสัดส่วนของเส้นใยที่มากขึ้น จึงทำให้เฟสเมทริกซ์ของยางสูตร NC4 เกิดโครงสร้างร่างแห Zn-Cellulose complex network มากขึ้น [15] ทำให้มีค่าความหนืดมากขึ้นเมื่อเทียบกับยางสูตร NC2 (สอดคล้องกับค่าแรงบิดเพิ่มขึ้น) จึงทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในเฟสเมทริกซ์เคลื่อนตัวไปรวมกันได้ยากขึ้น ไม่เกิดการรวมตัวกันของฟองแก๊สเหมือนกับในกรณีของยางสูตร NC2 ส่งผลให้รูพรุนของยางสูตร NC4 มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนในยางสูตร NC2



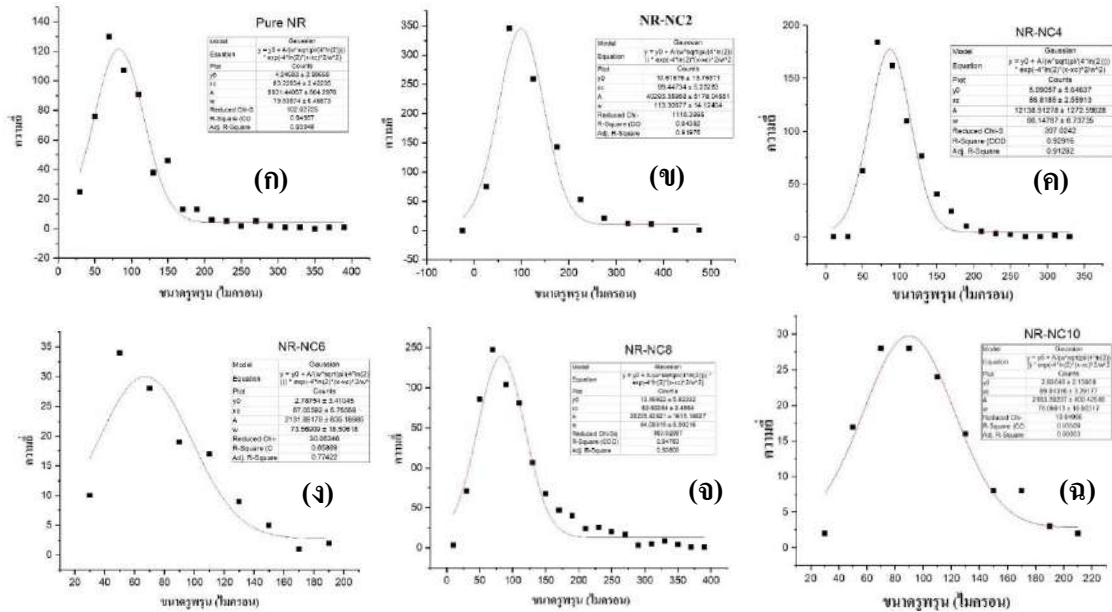
รูปที่ 4 ภาพถ่ายหน้าตัดขวางชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของชิ้นงาน Pure NR (ก), NC2 (ข), NC4 (ค), NC6 (ง), NC8 (จ) และ NC10 (ฉ) ที่กำลังขยาย 40 เท่า (40x)



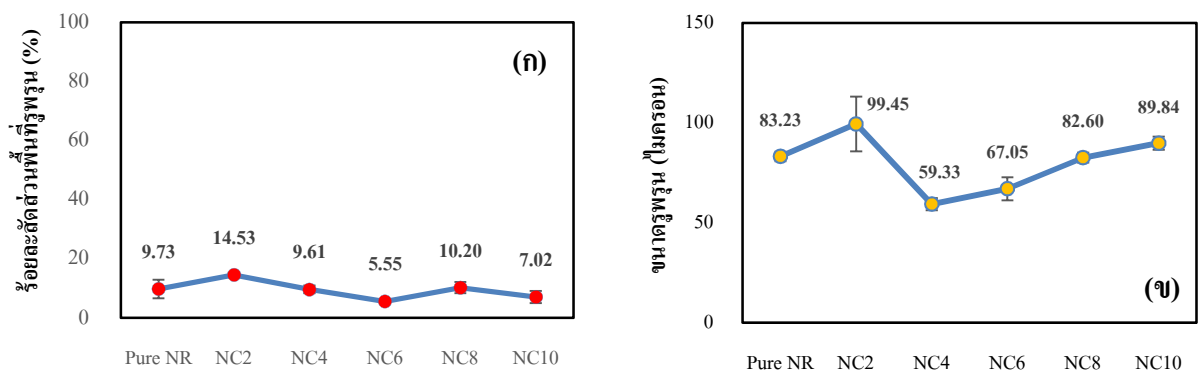
รูปที่ 5 ภาพถ่ายหน้าตัดขวางชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่ผ่านโปรแกรม ImageJ เพื่อหาพื้นที่รูพรุนของชิ้นงาน Pure NR (ก), NC2 (ข), NC4 (ค), NC6 (ง), NC8 (จ) และ NC10 (ฉ)



รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM และ SEM-EDX Scan mapping แสดงลักษณะทางกายภาพ และการกระจายตัวของธาตุออกซิเจนที่เป็นตัวแทนของเส้นใยบนชิ้นงาน (ก) Pure NR, (ข) NC2, (ค) NC4, (ง) NC6, (จ) NC8 และ (ฉ) NC10



รูปที่ 7 กราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในชิ้นงาน (ก) Pure NR, (ข) NC2, (ค) NC4, (ง) NC6, (ฉ) NC8 และ (จ) NC10 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OriginPro2021b ฟังก์ชัน Gaussian



รูปที่ 8 กราฟแนวโน้ม (ก) ร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุน และ (ข) ขนาดรูพรุนของชิ้นงานทุกสูตร

เมื่อพิจารณาชิ้นงานสูตร NC6 ที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสปริมาณ 6 phr พบว่าค่าร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนในชิ้นงานมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานสูตร NC4 ที่เป็นเช่นนี้เพราะชิ้นงานสูตร NC6 มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสในปริมาณที่มากขึ้น เส้นใยบางส่วนจึงเกาะตัวกันเป็นกลุ่มเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ดังปรากฏในรูปที่ 5-ง (ในวงกลมเส้นทึบ) ในขณะที่เส้นใยขนาดเล็กบางส่วนไม่เกาะกลุ่มจึงกระจายตัวไปทั่วเฟสเมทริกซ์ ทำให้เนื้อเยื่อเมทริกซ์โดยรวมมีความหนาแน่นมากขึ้น และทนต่อแรงดันของฟองแก๊สได้มากขึ้น จึงเกิดเป็นรูพรุนยากขึ้น และหากเกิดเป็นรูพรุน ก็จะเป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนในยางสูตร NC4

ในส่วนของชิ้นงานยางสูตร NC8 และ NC10 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 และ 6 จะเห็นได้ว่าเส้นใยนาโนเซลลูโลสในชิ้นงานมีการรวมกลุ่มกันจนเกิดเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ (100 – 300 ไมครอน) จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน อันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวของเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลทำให้มีสมบัติชอบน้ำและชอบกลับมารวมกลุ่มกันเอง [17, 25-26] ในขณะที่ยางมีสมบัติไม่ชอบน้ำ [16] ดังนั้นเมื่อสัดส่วนของเส้นใยเซลลูโลส

เพิ่มขึ้นมากจึงเกิดการแยกเฟสของวัสดุสองชนิดชัดเจนมากขึ้น ส่วนเส้นใยนาโนเซลลูโลสขนาดเล็กระดับนาโนเมตรนั้น ยังคงมีการกระจายตัวและเชื่อมกับเนื้อเมทริกซ์บางส่วนผ่านการเชื่อมโยงด้วย Zn-Cellulose complex network ด้วยเหตุนี้ ภายในเนื้อเยื่อจึงเหมือนมีวัสดุสองชนิดที่มีความแข็งแรงแตกต่างกันอยู่ร่วมกัน โดยส่วนที่เป็นกลุ่มเส้นใยขนาดใหญ่จะมีความแข็งแรงกว่าส่วนของเนื้อเยื่อเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ เมื่อสารทำให้เกิดฟองได้รับความร้อนและเกิดการแตกตัว ฟองแก๊สจึงเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อที่มีเส้นใยนาโนเซลลูโลสกระจายตัวอยู่แบบไม่หนาแน่น เพราะมีความแข็งแรงน้อยกว่า และแก๊สเหล่านี้อาจเคลื่อนที่มารวมตัวกัน จนทำให้เกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่ายางสูตร NC6

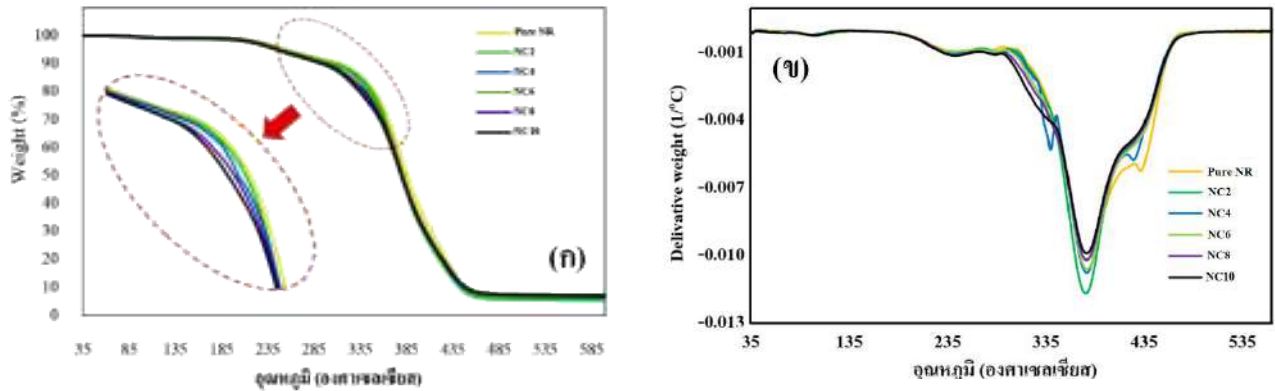
### 3.4 การสลายตัวทางความร้อนของโฟมยางธรรมชาติ และยางธรรมชาติผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าเส้นใยนาโนเซลลูโลสและไมโครเซลลูโลสมีการสลายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกัน โดยมีการสลายตัวช่วงแรกที่ช่วงอุณหภูมิ 25 – 200 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่มีการระเหยตัวของความชื้นที่อยู่ในเส้นใย และช่วงต่อมาคือช่วงอุณหภูมิการสลายตัวหลักของเส้นใยเซลลูโลส (thermal degradation temperature, Td) ซึ่งอยู่ในช่วง 250 – 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีขาดของสายโซ่หลัก (chain scission) และของโมเลกุลเชื่อมโยง (cross-link breakage) [15] โดยน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 330 -355 องศาเซลเซียส [15, 24] จากนั้น เซลลูโลสถูกเผาไหม้จนเกือบหมดที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส และเมื่อเผาจนถึง 700 องศาเซลเซียส จะมีเศษเซลลูโลสหลงเหลือประมาณร้อยละ 20 [24]

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการสลายตัวด้วยความร้อนระหว่างเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับยางธรรมชาติ พบว่าเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้น หากนำนาโนเซลลูโลสมาผสมกับยางธรรมชาติมักจะทำให้พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนโดยรวมมีแนวโน้มลดลง [19]

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 จากเทอร์โมแกรม TGA/DTG ในรูปที่ 9 ซึ่งเมื่อพิจารณารูปของชิ้นงาน Pure NR พบว่าชิ้นงานมีอุณหภูมิการสลายตัวของหน่วยย่อยไอโซพรีนที่อุณหภูมิ 376.8 องศาเซลเซียส [15] และเมื่อพิจารณาชิ้นงานทุกสูตร (ทั้งที่ไม่มีการเติมและมีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส) พบว่ามีกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในช่วงประมาณ 300 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งลักษณะกราฟมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานยางธรรมชาติผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส มีการสลายตัวทางความร้อนสองช่วง ช่วงแรกเป็นการทำลายพันธะของสายโซ่หลัก (chain scission) และสายโซ่โมเลกุลเชื่อมโยง (cross-link breakage) จนกลายเป็นสารประกอบ ถัดมาเป็นช่วงที่สารประกอบที่เกิดจากช่วงแรกเกิดการสลายตัว โดยอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของชิ้นงานจะมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสต่ำกว่าของยางธรรมชาติ นอกจากนี้ หากมีสัดส่วนและการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยนาโนเซลลูโลสมากขึ้น ก็จะช่วยส่งผลให้สมบัติการทนความร้อน (thermal stability) มีแนวโน้มลดลงด้วย [15] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาลักษณะเส้นกราฟการสลายตัวของชิ้นงานทุกสูตร พบว่าเส้นกราฟมีลักษณะลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง (ไม่มีการแบ่งช่วงเป็นขั้นอย่างชัดเจน) ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานที่มีการเติม

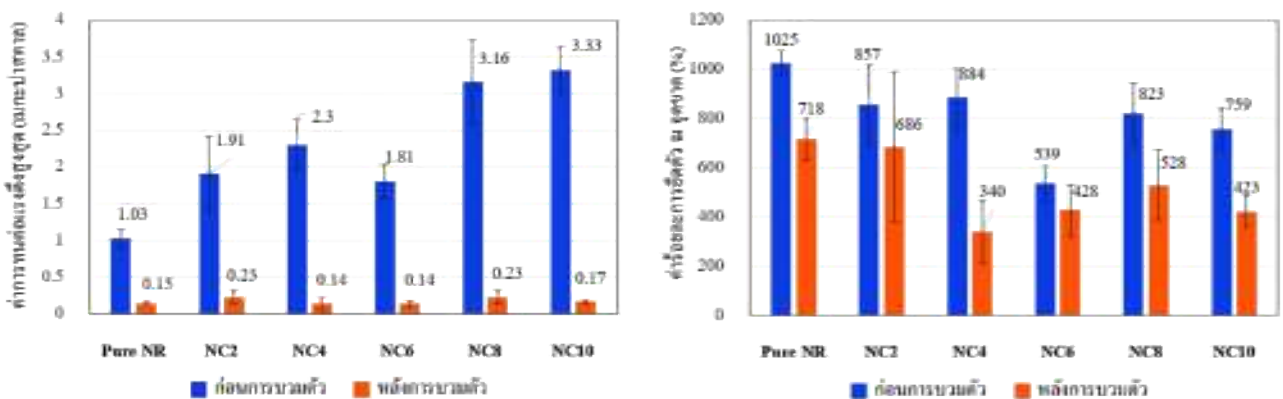
เส้นใยนาโนเซลลูโลสมีการกระจายตัวได้ดีในเนื้อยาง และที่สำคัญคือเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ [27] สอดคล้องกับผลจากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 5-จ และ 7-จ ที่ไม่พบรอยแยกบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับยาง แสดงว่าเส้นใยและยางมีการเข้ากันได้ แม้ว่าจะไม่ได้ตัดแปรรูปเส้นใยก็ตาม ซึ่งเป็นเพราะว่าระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยนาโนเซลลูโลสมีแรงดึงดูดระหว่างกันที่เพียงพอที่จะทำให้ไม่เกิดการแยกออกของทั้งสองเฟส ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการเกิดโครงสร้างร่างแห Zn-Cellulose complex network ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [15-16]



รูปที่ 9 TGA (ก) และ DTG (ข) เทอร์โมแกรมของชิ้นงาน Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10

### 3.5 การเปรียบเทียบสมบัติสมบัติเชิงกลของยางสูตรต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน

รูปที่ 4-ก และ 5-ข แสดงค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของชิ้นงานยาง Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 ทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน ซึ่งการอภิปรายผลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของยางสูตรต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังการบวมตัวจากน้ำมันเบนซินจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป



รูปที่ 10 เปรียบเทียบค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด (ก) และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (ข) ของชิ้นงาน Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 ทั้งก่อนและหลังการบวมตัวจากน้ำมันเบนซิน

### 3.5.1 สมบัติเชิงกลก่อนการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่ได้มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงในยางธรรมชาติ พบว่าการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงในยางธรรมชาติ จะช่วยทำให้ยางมีสมบัติการทนต่อแรงดึงดีขึ้น และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ซึ่งการที่ชิ้นงานยางมีความแข็งแรงขึ้นและยืดตัวได้น้อยลงนั้น ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลของเนื้อยางและ Zn-Cellulose complex network เพียงเท่านั้น แต่ยังเกิดขึ้นจากการเกี่ยวพันกันและแรงดึงคูดทางกายภาพของเส้นใยนาโนเซลลูโลสด้วย โดยเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากจะมีการเกี่ยวพันกันมาก ทำให้มีแรงดึงคูดระหว่างเส้นใยอันเนื่องมาจากความมีขี้ของหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยด้วยตัวเอง จึงทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่ามากขึ้น และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าลดลง เพราะยืดตัวได้น้อยลง [15, 28]

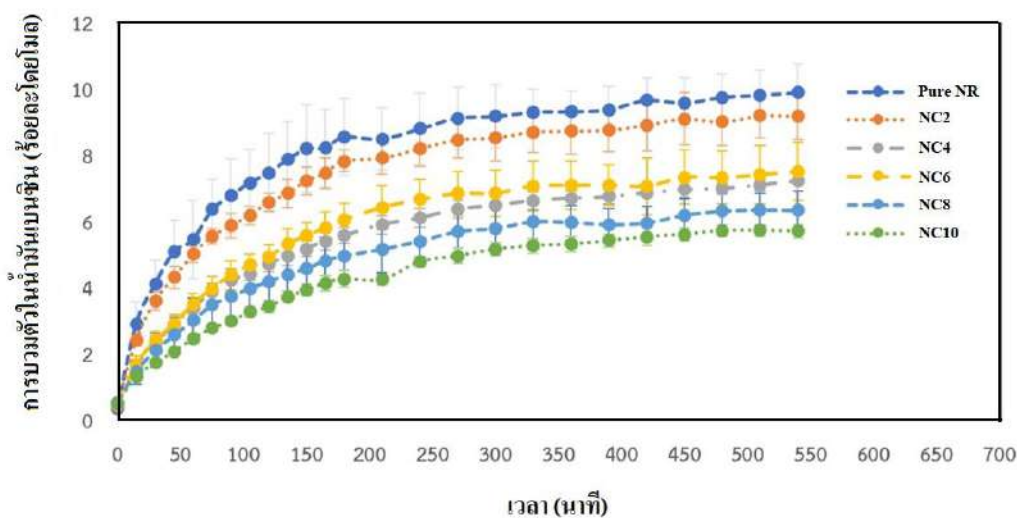
จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่าค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มากขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้มีข้อแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้คือ ชิ้นงานของงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม ในขณะที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่มีรูปทรงแปดเหลี่ยม จึงมีความแตกต่างของผลการทดลอง กล่าวคือในกรณีของสูตร NC6 พบว่าค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับสูตร NC4 ทั้งที่มีปริมาณของเส้นใยนาโนเซลลูโลสมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่ชิ้นงาน NC6 มีค่าร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูปทรงแปดเหลี่ยมที่น้อยกว่าทุกสูตร อันเนื่องมาจากเส้นใยนาโนเซลลูโลสในชิ้นงาน NC6 เริ่มมีการเกาะกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่กระจายอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ แต่ทั้งกลุ่มของเส้นใยและรูปทรงแปดเหลี่ยมมีการกระจายไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4-ง และ 6-ง ในขณะที่เดียวกันก็มีเส้นใยนาโนเซลลูโลสบางส่วนกระจายตัวในเนื้องาน (ในส่วนที่ไม่มีการเกาะกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ของเส้นใย) ทำให้เนื้อเมทริกซ์ในแต่ละส่วนมีความแข็งแรงไม่เท่ากัน เกิดจุดอ่อนแอขึ้นบริเวณรอยต่อของทั้งสองเฟส จึงทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดของชิ้นงาน NC6 มีค่าต่ำสุด เมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ ที่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสสูตรอื่น

แต่อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบสูตร Pure NR กับสูตร NC6 พบว่ายางสูตร NC6 ก็ยังมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดมากกว่า และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่ายางสูตร Pure NR เนื่องจากยางสูตร NC6 มีการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุลของเนื้อยางและ Zn-Cellulose complex network ร่วมด้วย รวมถึงมีการเกี่ยวพันกันและแรงดึงคูดทางกายภาพของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มี high aspect ration ด้วย [15, 28]

### 3.5.2 ผลการทดสอบการบวมตัวของยางและยางผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสในน้ำมันเบนซิน

จากรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำมันเบนซินที่เวลาต่าง ๆ ของชิ้นงานยาง Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 พบว่าชิ้นงานที่มีอัตราการบวมตัวเร็วที่สุดคือ Pure NR ซึ่งอัตราเร็วในการบวมตัวในน้ำมันเบนซินของยางสูตรต่าง ๆ มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่มากขึ้น ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ยางสูตร Pure NR บวมตัวได้เร็วที่สุด เป็นเพราะชิ้นงานดังกล่าวไม่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลส ทำให้มีเพียงแค่ปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลของเนื้อยางด้วยสารเชื่อมโยงโมเลกุลที่เป็นปัจจัยสนับสนุนให้ยาง Pure NR ทนต่อการบวมตัวได้ แต่ในกรณีของยางที่มีการผสมเส้นใยนาโนเซลลูโลสนั้น นอกจากการเกิดโครงสร้างร่างแหที่เกิด

จากการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและสารเชื่อมโยงโมเลกุลแล้ว ยังพบว่าเส้นใยนาโนเซลลูโลสจะช่วยลดเส้นทางการดูดซับ (tortuous partway) ของน้ำมันเบนซินเข้ามาในเนื้อยาง อีกทั้งยังทำให้เนื้อยางมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลง และเส้นใยนาโนเซลลูโลสยังทำให้เกิด Zn-Cellulose complex network ในเนื้อยาง นอกจากนี้ เส้นใยนาโนเซลลูโลสยังมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีจำนวนมากอยู่ในสายโซ่ที่มี aspect ratio สูง ซึ่งจะช่วยยับยั้งและขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำมันเบนซินที่ไม่มีขั้วได้มากขึ้น [15, 28]



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบอัตราการบวมตัวของยางในน้ำมันเบนซิน

หากพิจารณาในส่วนของชิ้นงานที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส พบว่าชิ้นงานที่มีอัตราการบวมตัวเร็วรองลงมาจากชิ้นงาน Pure NR คือชิ้นงาน NC2 เพราะมีปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลสน้อยสุด และปริมาณร้อยละสัดส่วนพื้นที่รูพรุนสูงสุด จึงทำให้น้ำมันเบนซินสามารถแทรกตัวเข้าไปตามรูพรุนและช่องว่างระหว่างโมเลกุลได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะการกระจายตัวและความหนาแน่นของเส้นใยนาโนเซลลูโลสในเนื้อเมทริกซ์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราการบวมตัวของชิ้นงานอีกด้วย

หากพิจารณาชิ้นงานยางสูตร NC4 ที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส 4 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่กลับพบว่า NC4 มีการบวมตัวช้ากว่าชิ้นงาน NC2 อย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของยางสูตร NC4 และ Pure NR (รูปที่ 4-ค และ 4-ก) ที่มีปริมาณสัดส่วนพื้นที่ของเมทริกซ์และรูพรุนใกล้เคียงกัน แต่กลับมีอัตราการบวมตัวช้ากว่ายางสูตร Pure NR เป็นอย่างมาก นั่นหมายความว่าสัดส่วนรูพรุนในชิ้นงานไม่ได้เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการบวมตัว แต่ปัจจัยหลักเกิดจากลักษณะของเนื้อเมทริกซ์นั้น กล่าวคือยางสูตรที่มีเส้นใยนาโนเซลลูโลสกระจายตัวอย่างดีและหนาแน่น จะมีการบวมตัวที่ต่ำกว่ายางที่ไม่มีส่วนผสมของเส้นใยนาโนเซลลูโลส อันเนื่องมาจากมีอันตรกิริยาต่างกัน ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.5.1

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานยางสูตร NC4 และ NC6 พบว่ายางสูตร NC4 มีการอัตราการดูดซับและบวมตัวช้ากว่ายางสูตร NC6 เนื่องมาจากยางสูตร NC4 มีการกระจายตัวของเส้นใยนาโนเซลลูโลสได้ดีทั่วทั้งเมทริกซ์ (รูปที่ 4-ค)



จึงทำให้มีอันตรกิริยากับเส้นใยด้วยกันเองและกับยางเมทริกซ์เกิดเป็น โครงสร้างร่างแห Zn-Cellulose complex network [15, 28] จึงทำให้ยางสูตร NC4 มีการอัตราการบวมตัวช้ากว่า NC6 เพราะยางสูตร NC6 มีการกระจายตัวของเส้นใยได้ไม่ดีเท่าของยางสูตร NC4

จากรูปที่ 4 และ 6 เมื่อพิจารณายางสูตร NC6, NC8 และ NC10 พบว่าแนวโน้มการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน ลดลงเมื่อมีสัดส่วนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสมากขึ้น โดยลักษณะสัณฐานวิทยาของยางทั้งสามสูตร พบว่ามีการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยจนเกิดเป็นเฟสขนาดใหญ่ของเส้นใยกระจายอยู่ในเนื้อยางเมทริกซ์ แต่ยางสูตร NC8 และ NC10 มีเส้นใยขนาดเล็กกระจายอยู่ในเฟสของเนื้อยาง (เหมือนกันกรณีของยางสูตร NC4) มากกว่าในสูตร NC6 (ตามสัดส่วนที่มากขึ้น) จึงทำให้มีอัตราการการบวมตัวในน้ำมันเบนซินช้ากว่ายางสูตร NC6

### 3.5.3 สมบัติเชิงกลหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน

รูปที่ 10-ก และ 10-ข เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซินพบว่า ชิ้นงาน Pure NR, NC2, NC4, NC6, NC8 และ NC10 หลังการบวมตัวในน้ำมันเบนซิน มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางมีสมบัติไม่มีขั้วเช่นเดียวกับน้ำมันเบนซิน จึงดูดซับน้ำมันเบนซินได้ดี จนทำให้สายโซ่โมเลกุลในจุดที่ไม่มีการเชื่อมโยงโมเลกุลหรือจุดที่มีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวออก

นอกจากนี้ ยังพบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงหลังจากผ่านการบวมตัวมากที่สุด คือ ชิ้นงาน NC2 และ NC4 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเส้นใยสูตรดังกล่าวมีการกระจายตัวได้ดีกว่าสูตรอื่น และไม่จับตัวเป็นกลุ่มก้อน จึงช่วยทำให้ชิ้นงานหลังจากการบวมตัวมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานสูตรอื่น

## 4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นวัสดุซ่อมแซมตัวเองของถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้ ซึ่งทำจากยางธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นรูปพรุน โดยนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสผสมลงในเนื้อยางธรรมชาติเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวจากน้ำมันเบนซิน จากผลการทดลองพบว่าการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสลงไป ในเนื้อยางธรรมชาติช่วยทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดมากขึ้น และมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลง สอดคล้องกับมีอัตราการบวมตัวในน้ำมันเบนซินลดลงเช่นกัน จากการศึกษาพบว่าสูตรยางที่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นวัสดุซ่อมแซมตัวเองได้ดีที่สุด คือ ยางสูตร NC2 ซึ่งเป็นสูตรที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส 2 phr เนื่องจาก มีอัตราการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำมันเบนซินได้เร็วที่สุด (เมื่อเทียบกับสูตรที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสสูตรอื่น) และมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุด มากกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมเส้นใยทั้งก่อนและหลังการบวมตัว ซึ่งทั้งสองเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุซ่อมแซมตัวเองได้ที่ใช้กับถังน้ำมันซ่อมแซมตัวเองได้ โดยงานวิจัยนี้พบว่าการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสช่วยทำให้ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นที่มีลักษณะเป็นรูปพรุนเหมือนกันได้ โดยหากต้องการเพิ่มความแข็งแรงของยางเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงอัตราการบวมในน้ำมันเบนซิน ก็สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลสพร้อมทั้งทำการ

คัดแปร โครงสร้างโมเลกุลของผิวเส้นใยนาโนเซลลูโลสให้มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถลดความมีขี้้ว ลดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใย และเพิ่มความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติให้มากขึ้น ซึ่งคาดว่าจะการปรับปรุงดังกล่าวจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโฟมยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามหนังสือสัญญาเลขที่ Res-CIT603/2021 โดยทีมงานวิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท เคมีอินโนเวชั่น จำกัด ที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย ศูนย์วิจัยนวัตกรรมยางพารา (RIR) สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (STRI) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ห้องปฏิบัติการวัสดุผง คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือในการทำวิจัย

### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.A. Underwood, W.S. Wickersham Jr., R.W. Sutton, “Self-sealing fuel cell wall”, US patent 3509016, issued April 28, 1970, Available: <https://www.freepatentsonline.com/3509016.html> [January 5, 2021].
- [2] P.J. Dasher, “Self-sealing fuel tank”, US Patent 2438965, 1948, April 6, 1948. Available: <https://www.freepatentsonline.com/2438965.html> [January 11, 2021].
- [3] T.S. Ohnstad, R.A. Monk, “Sealing-reaction, layer-effective, stealth liner for synthetic fuel container”, US patent 2009/0050629 A1. Available: <https://www.freepatentsonline.com/y2009/0050629.html> [January 10, 2021].
- [4] L. Spenadel, “Synthetic rubber for self-sealing fuel tanks”, Applied Science Research Laboratory, Vol.51, No. 6, 1959, pp. 935–936.
- [5] ธนวิษญ์ ภาคอรธร, มนต์วิน แก้วทิพย์, ยศวีร์ พูนจันทร์ และ สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา, “ผลกระทบของการเติมสารเชื่อมโยงโมเลกุลและสารทำให้เกิดฟองที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติ: สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันเชื้อเพลิง”, วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, 2564, หน้า 149-168.
- [6] C.C. Chin, N.D.L. Musbah, I. Abdullah and A.M. Lazim, “Characterization and evaluation of prudent liquid natural rubber-based foam for oil spill control application”, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 43, 2018, pp. 6097–6108.

- [7] M. Barlkani and C. Hepburn, "Determination of crosslink density by swelling in the castable polyurethane elastomer based on 1/4-cyclohexane diisocyanate and para-phenylene diisocyanate", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol.1, No.1, 1992, pp. 1–5.
- [8] A. Khalaf, A. Yehia, M. Ismail and H. El-Sabbagh, "High performance oil resistant rubber", *Open Journal of Organic Polymer Materials*, Vol. 2, No. 40, 2012, pp. 88–93.
- [9] R. Maharsia, N. Gupta and H.D. Jerro, "Investigation of flexural strength properties of rubber and nanoclay reinforced hybrid syntactic foams", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 417, No.1, 2006, pp. 249–258.
- [10] O. Okay, S. Durmaz and B. Erman, "Solution cross-linked poly (isobutylene) gels: synthesis and swelling behavior", *Macromolecules*, Vol. 33, No. 13, 2000, pp. 4822–4827.
- [11] พงษ์ธร แซ่ฮุย, ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, พิมพ์ครั้งที่ 2, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปทุมธานี, 2548.
- [12] พงษ์ธร แซ่ฮุย, สารเคมียาง, พิมพ์ครั้งที่ 1, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปทุมธานี, 2548.
- [13] ธนพงษ์ เชื้อฉุน, "การศึกษาผลกระทบของเส้นใยปอแก้วที่มีต่อสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิโค้งตัวด้วยความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิไบิวทีลีนซักซิเนต," *ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2555, หน้า 17-22.
- [14] Y.M. Zhou, S.Y. Fu, L.M. Zheng and H.Y. Zhan, "Effect of nanocellulose isolation techniques on the formation of reinforced poly (vinyl alcohol) nanocomposite films", *EPRESS Polymer Letters*, Vol.6, No. 10, 2012, pp. 794-804.
- [15] E. Abraham, M.S. Thomas, C. John, L.A. Pothen, O. Shoseyov and S. Thomas, "Green nanocomposites of natural rubber/nanocellulose: Membrane transport, rheological and thermal degradation characterisations", *Industrial Crops and Products*, Vol. 51, 2013, pp. 415-424.
- [16] K. Hayato, N. Fumiaki, A. Kentaro and Y. Hiroyuki, "Crosslinking via vulcanization of natural rubber and cellulose nanofibers incorporating unsaturated fatty acid", Vol.5, 2015, pp. 29814-29819.
- [17] R. Kumarjyoti, P. Aphiwat, C.D. Subhas and P. Pranut, "Application of cellulose as green filler for the development of sustainable rubber technology", *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 4, 2021, 100140.
- [18] D.Y.S. Low, J. Supramaniam, A. Soottitawat, T. Charinpanitkul, W. Tanthapanichakoon, K.W. Tan and S.Y. Tang, "Recent Developments in Nanocellulose-Reinforced Rubber Matrix Composites: A Review", *Polymers*, Vol. 13, 2021, pp. 550.

- [19] S. Pavlidou, and C.D. Papaspyrides, “A review on polymer-layered silicate nanocomposites”, *Progress in Polymer Science*, Vol. 33, 2012, pp. 1119-1198.
- [20] K. Yuwawech, J. Wootthikanokkhan and S. Tanpichai, “Effects of two different cellulose nanofiber types on properties of poly (vinyl alcohol) composite films”, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2015, pp. 1-10.
- [21] K. Yuwawech, J. Wootthikanokkhan, S. Wanwong and S. Tanpichai, S., “Polyurethane/esterified cellulose nanocrystal composites as a transparent moisture barrier coating for encapsulation of dye sensitized solar cells”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 134, 2017, pp. 1-12.
- [22] Z. Karim and A. Svedberg, “A Controlled retention and grainage of microfibrillated cellulose in continuous paper product”, *New Journal of Chemistry*, Vol.44, 2020, pp. 13796-13806.
- [23] M.-C., Li, Q. Wu, K. Song, S. Lee, Y. Qing and Y. Wu, “Cellulose nanoparticles: Structure-morphology-rheology relationships”, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, Vol.3, 2015, pp. 821-832.
- [24] G. Molinari, V. Gigante, S. Fiori, L. Aliotta and A. Lazzeri, “Dispersion of Micro Fibrillated Cellulose (MFC) in Poly(lactic acid) (PLA) from Lab-Scale to Semi-Industrial Processing Using Biobased Plasticizers as Dispersing Aids”, *Chemistry*, Vol.3, 2021, pp. 896-915.
- [25] W. Jiang, P. Shen, J. Yi, L. Li, C. Wu and J. Gu, “Surface modification of nanocrystalline cellulose and its application in natural rubber composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.137, 2020, pp. 1-10, Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.49163> [October 30, 2021].
- [26] S. Singh, G.L. Dhakar, B.P. Kapgate, P.K. Maji, C. Verma, M. Chhajed, K. Rajkumar and C. Das, “Synthesis and chemical modification of crystalline nanocellulose to reinforce natural composites”, *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 31, 2020, pp. 3059-3069.
- [27] S. Phomrak, A. Nimpaiboon, B.-m.Z. Newby and M. Phisalaphong, “Natural Rubber Latex Foam Reinforced with Micro- and Nanofibrillated Cellulose via Dunlop Method”, *Polymers*, Vol. 12, No. 9, 2020, pp. 1959.
- [28] E. Abraham, B. Deepa, L.A. Pothan, S., M. John, S.S. Narine, S. Thomas and R. Anandjiwala, “Physicomechanical properties of nanocomposites based on cellulose nanofibre and natural rubber latex”, *Cellulose*, Vol. 20, 2013, pp. 417-427.