รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงวิธีการเตรียมผงยางพาราขนาดเล็กที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

โดย ผศ.ดร. มณิศรา พิริยวิรุตม์และคณะ

เมษายน 2553

สัญญาเลขที่ RDG5250029

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงวิธีการเตรียมผงยางพาราขนาดเล็กที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ผศ.ดร. มณิศรา พิริยวิรุตม์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. น.ส. ชรินรัตน์ น้อยจิ๋ว	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. นายดำรงค์ศักดิ์ บุรกิจภาชัย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4. นายเฉลิมเกียรติ เกษก้อน	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การปรับปรุงวิธีการเตรียมผงยางพาราขนาดเล็กที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
(ภาษาอังกฤษ) Improvement of Preparation of Natural Rubber Powder from Electrospinning

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสารและ E-mail
ชื่อ-สกุล ผศ.ดร. มณิศรา พิริยวิรุฒม์
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ 126 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพ ฯ 10140
โทรศัพท์/โทรสาร 0-2470-9217 / 0-2872-9080 E-mail Manisara.pee@kmutt.ac.th

นักศึกษาหรือนักวิจัย หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสารและ E-mail
ชื่อ-สกุล นางสาวชรินรัตน์ น้อยจิ๋ว
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ 126 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพ ฯ 10140
โทรศัพท์/โทรสาร 08-5153-8997 E-mail -

นักศึกษาหรือนักวิจัย หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสารและ E-mail
ชื่อ-สกุล นายดำรงค์ศักดิ์ บุรกิจภาชัย
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ 126 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพ ฯ 10140
โทรศัพท์/โทรสาร 08-6592-5466 E-mail -

นักศึกษาหรือนักวิจัย หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสารและ E-mail
ชื่อ-สกุล นายเฉลิมเกียรติ เกษก้อน
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ 126 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพ ฯ 10140
โทรศัพท์/โทรสาร 08-4661-7861 E-mail -

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ (โดยย่อประมาณ 5 บรรทัด)

การเตรียมผงของยางพาราขนาดเล็กนั้นทำได้โดยการขึ้นรูปผ่าน**กระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning)** แต่ผงยางพาราที่เตรียมได้ยึดติดกันเป็นแพ ไม่แยกออกเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ซึ่งอาจเกิดปัญหาได้หากนำไปเติมลงในพอลิเมอร์เพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงวิธีการเตรียมผงยางพาราไม่ให้ติดกัน โดยเติมสารประเภทสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) หรือน้ำมันละหุ่ง ลงในของเหลวที่ใช้ในการแข็งตัวของน้ำยาง (งานวิจัยนี้ใช้กรดอะซีติก) เพื่อให้ผงยางพาราที่เตรียมได้แยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ โครงการวิจัยนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในการเตรียมผงยางพาราขนาดเล็กเพื่อเอาไปใช้เป็นวัสดุเพิ่มความเหนียวของพอลิเมอร์ได้

วัตถุประสงค์ (ตามที่ระบุในสัญญารับทุนวิจัย)

เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมในการขึ้นรูปผงยางพาราขนาดเล็กด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

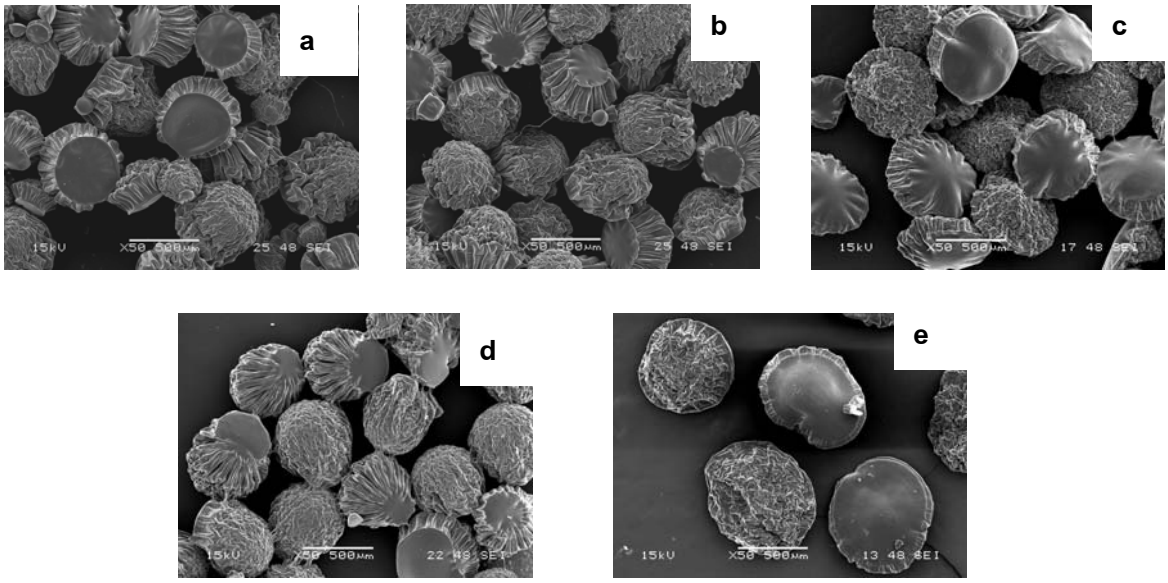
ผลการดำเนินงาน

น้ำยางข้นผสมสารเคมีความเข้มข้น 70 % สามารถเตรียมได้จากนำน้ำยางข้นชนิด High ammonia 60% ทำการอบไล่น้ำเพื่อให้ได้น้ำยางข้น 70 % แล้วเติมสารเคมีลงในน้ำยางข้น จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นเม็ดยางพาราขนาดเล็กโดยใช้กระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงอุปกรณ์รองรับ 35 เซนติเมตร พบว่าน้ำยางพาราผสมสารเคมีที่ไม่เติมสารประเภทสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซีติก (ของเหลวที่ใช้ในการแข็งตัว) ให้ผลการปั่นเป็นเม็ดขนาดเล็กที่จับตัวกันเป็นแพ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ โดยเม็ดยางพาราที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดยางที่ได้อยู่ในระดับไมโครเมตร แต่การกระจายของเม็ดที่ได้แตกต่างกันไปเป็นผลมาจากชนิดและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและน้ำมันละหุ่งที่ใช้ในการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตดังนี้

การเติมน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซีติก เม็ดที่ได้จะไม่ติดกันเป็นแพ แต่แยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ เพราะน้ำมันละหุ่งไปห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ก่อนที่จะเกิดการแข็งตัวเมื่อตกลงสู่ชั้นของกรดอะติกในภายหลัง ส่วนการเติมสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Nonidet P40, SDS และ CTAB เม็ดที่ได้ยังยึดติดกันเป็นแพ ไม่สามารถแยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ เนื่องจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึวผิวที่ไม่มากพอจนถึงจุด Critical Micelle Concentration (CMC) ที่จะทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดเป็น Micelle ห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ และยังมีสาเหตุมาจากประจุของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดดังนี้ SDS เป็นประจุลบจึงไปผลักเม็ดยางออกจากตัวเอง เม็ดยางจึงมีโอกาสชนกับเม็ดอื่นได้ ทำให้เม็ดยางเกิดการติดกัน และ CTAB เป็นประจุบวก จึงเกิดแรงดึงดูดกันของสารลดแรงตึงผิวกับเม็ดยาง เม็ดยางจึงมีโอกาสเจอกัน ทำให้เม็ดยางเกิดการติดกันได้ ส่วน Nonidate P40 ไม่มีประจุ ทำหน้าที่เพียงลดแรงดึงดูดที่ผิวของเม็ดยางเท่านั้น จะไม่เกิดการผลัก หรือดูดกันของอนุภาค จึงทำให้เม็ดยังคงยึดติดกัน

สำหรับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและน้ำมันละหุ่งที่เติมลงในกรดอะซีติก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น ขนาดของเม็ดที่ได้จะมีแนวโน้มเล็กลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากน้ำมันละหุ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่ากรด จึงแยกตัวและเกิดเป็นชั้นฟิล์มลอยตัวอยู่บนกรดอะซิติก เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น ชั้นของน้ำมันละหุ่งที่ลอยตัวอยู่บนชั้นของกรดอะซิติกก็จะหนาขึ้น และน้ำมันละหุ่งที่มีความเข้มข้นมากกว่า ก็ย่อมมีความหนืดมากกว่า ทำให้เม็ดยางมีโอกาสขยายตัวได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นขนาดเม็ดยางที่ได้จึงมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ SDS, CTAB, และ Nonidate P40 คือ เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น ขนาดของเม็ดยางที่ได้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวของกรดอะซิติกจะน้อยลง เม็ดยางจึงมีโอกาส

ขยายตัวได้มากกว่า แต่ด้วยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มากนัก จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของขนาดเม็ดมากนัก อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถทำการทดลองในปริมาณที่มากกว่านี้ได้ เนื่องมาจากความสามารถในการละลายของ SDS ซึ่งเมื่อความเข้มข้นเกิน 6%w/v จะไม่สามารถละลายเข้ากับกรดอะซิติกได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ CTAB ในปริมาณที่เท่ากันในการเปรียบเทียบ ส่วน Nonidate P40 เมื่อใช้ในความเข้มข้นที่มากกว่านี้ เม็ดยางจะไม่เป็นรูปทรงกลม เนื่องจากกรดอะซิติกถูกเจือจางไปมาก ทำให้โอกาสที่เม็ดยางจะพบกับกรดก็ยากขึ้น จึงเกิดการแข็งตัวได้ยาก



รูปที่ 1. รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X ของน้ำยางพาราผสมสารเคมีความเข้มข้น 70% ศักย์ไฟฟ้า 25 kV ระยะห่าง 35 cm a) ไม่ผสมสารลดแรงตึงผิว b) CTAB c) Nonidate P40 d) SDS และ e) น้ำมันละหุ่ง

<u>สรุปผลการวิจัย</u>

น้ำมันละหุ่งมีผลต่อการกระจายของเม็ดยางที่ได้ โดยพบว่า เมื่อเติมน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซิก (ของเหลวที่ใช้ในการแข็งตัวของน้ำยาง) เม็ดที่ได้จะไม่ติดกันเป็นแพ แต่แยกอิสระออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยว ๆ ส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบบวก (CTAB) ทำให้ได้เม็ดยางพาราติดกันเป็นแพ และผิวของเม็ดยางเชื่อมติดกันมากกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) อีกทั้งยังมีความกลมความสมมาตรของเม็ดยางน้อยกว่าในขณะที่สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonidate P40) จะทำให้ได้เม็ดยางที่เป็นรูปทรงกลมและสมมาตรกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุทั้งสองข้างต้น นอกจากนี้ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและน้ำมันละหุ่งยังมีผลต่อขนาดของเม็ดที่ได้ โดยพบว่า เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งมากขึ้น ขนาดของเม็ดที่ได้จะเล็กลง ดังนั้นน้ำมันละหุ่งที่ความเข้มข้น 100% ทำให้ได้เม็ดยางพาราที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีความกลมสมมาตรมากที่สุด รองลงมาคือ 75% และ 50% ตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นมาก หรือน้อยกว่านี้จะส่งผลไม่ดีต่อเม็ดยางที่ได้แล้ว โดยเม็ดยางดังกล่าวมีขนาดอยู่ในช่วง 640–881 ไมโครเมตร ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับสารลดแรงตึงผิวที่เมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ขนาดของเม็ดที่ได้จะใหญ่ขึ้น โดยขนาดเม็ดยางที่รองรับด้วย SDS, CTAB และ Nonidate P40 จะอยู่ในช่วง 785-795, 582-947 และ 504-787 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ความเข้มข้นของน้ำยางพาราผสมสารเคมีที่ใช้คือ 70 % ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้คือ 25 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงอุปกรณ์รองรับที่ใช้คือ 35 เซนติเมตร

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

ในการขึ้นรูปเม็ดยางพาราขนาดเล็กด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตดังกล่าวข้างต้น พบว่าหากเติมน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซิติก เม็ดยางที่ได้มีลักษณะแยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ไม่ติดกันเป็นแพ ซึ่งสามารถนำเม็ดยางดังกล่าวไปใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์ได้

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

-

รหัสโครงการ: RDG5250029
ชื่อโครงการ: การปรับปรุงวิธีการเตรียมผงยางพาราขนาดเล็กที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต
ชื่อนักวิจัย: ผศ.ดร. มณิศรา พิริยวิรุตม์
น.ส. ชรินรัตน์ น้อยจิ๋ว
นายดำรงค์ศักดิ์ บุรกิจภาชัย
นายเฉลิมเกียรติ เกษก้อน
สังกัด: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โทรศัพท์: 0-2470-9217
E-mail: Manisara.pee@kmutt.ac.th
ระยะเวลาโครงการ: 9 เดือน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการขึ้นรูปเม็ดยางพาราขนาดเล็กด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้น้ำยางข้นและน้ำยางพาราผสมสารเคมีความเข้มข้น 70% w/v ศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ กำหนดระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงอุปกรณ์รองรับเป็น 35 เซนติเมตร จากนั้นทำการศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวสามชนิดคือ โซเดียมโดดิซิล ซัลเฟต (Sodium dodecyl sulphate , SDS), นอนไอเดทพีสี่สิบ (Nonidet P40), ซีทิลไตรเมทิล แอมโมเนียโบรไมด์ (Cetyltrimethyl ammonium bromide, CTAB) และน้ำมันละหุ่งที่มีผลต่อเม็ดยางพารา เช่น ลักษณะรูปทรงของเม็ดยาง ผิว ขนาด และการแยกตัวของเม็ดยาง เมื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าจะได้ผลการปั่นที่เป็นเม็ดระดับไมโครเมตร และผลของสารลดแรงตึงผิวทั้งสามชนิดนั้นยังคงไม่ทำให้เม็ดยางพาราแยกออกจากกัน ในขณะที่น้ำมันละหุ่งนั้นทำให้เม็ดยางพาราแยกอิสระออกจากกันได้ดี โดยเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งพิ่มขึ้น ขนาดของเม็ดยางที่ได้จะเล็กลง

คำสำคัญ: การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต/ น้ำยางข้น/ น้ำยางพาราผสมสารเคมี/ สารลดแรงตึงผิว/ น้ำมันละหุ่ง

Project code: RDG5250029

Project title: Improvement of Preparation of Natural Rubber Powder from Electrospinning

Investigators: Asst.Prof.Dr. Manisara Phiriyawirut
Miss Charinrut Noijiw
Mr. Damrongsak Burakijphachai
Mr. Chalermkiat Ketkon
Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi

Telephone number: 02-470-9217

E-mail: Manisara.pee@kmutt.ac.th

Project duration: 9 months

Abstract

The natural rubber fine-powder from 70 w/v% NR latex and compound NR latex were prepared from electrospinning technique with 25 kilovolt/ 35 centimeter. The effects of type and concentration of surfactants and castrol oil on the isolation of NR fine-powder, surface morphology and size were investigated. The surfactants were Sodium dodecyl sulphate (SDS), cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) and Nonidet P40. After electrospun and analyzed by scanning electron microscope (SEM), it was found that NR latex can be formed in white droplets with sphere shape and micrometer size when contracted with acetic acid. However, droplets still agglomerated like sheet when added surfactants to acetic acid. Successfully, castor oil can improve the isolation of the droplets. The size of NR fine-powder can be controlled by proper adjustment of the concentration of surfactant and oil. If was found that the size of fine-powder increased with increasing surfactant concentration but decreased with increasing concentration of castor oil.

Keyword: Electrospinning / Natural rubber latex/ Natural rubber latex with chemical/ Surfactants/ Castrol oil

ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้รับทุนวิจัย SPR 51 เรื่อง "**การศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมผงยางพาราขนาดนาโนด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์**" พบว่าเมื่อทำการปั่นน้ำยางพาราผสมสารเคมีด้วยไฟฟ้าสถิตและปล่อยให้ตกลงบนกรดอะซีติก พบว่าน้ำยางพาราผสมสารเคมีเกิดการแข็งตัว ในขณะเดียวกันเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าทำให้น้ำยางพาราผสมสารเคมีจัดเรียงตัวอยู่ในรูปทรงกลมและหลุดออกจากปลายเข็ม เมื่อตกลงบนกรดอะซีติกเข้มข้น น้ำยางพาราจะเสียสภาพและจับตัวแข็งเป็นทรงกลมได้ เนื่องจากกรดอะซีติกสามารถสลายตัวให้อิออนบวกของไฮโดรเจน (H^+) โดย H^+ จะทำลายอนุมูลอิสระของคาร์บอกซีเลตที่อยู่รอบๆ อนุภาคยางซึ่งทำหน้าที่รักษาความเสถียรในการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยางพารา เกิดเป็นกรดไขมัน (Fatty acid) ขึ้นรอบอนุภาคของยาง ทำให้พลังยึดรอบอนุภาคยางสูญเสียไป ชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางแฟบลง สถานการณ์เป็นสารแขวนลอยของน้ำยางจะเสียไป อนุภาคยางจะรวมตัวและจับเป็นก้อนซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเม็ดน้ำยางที่ขึ้นรูปได้มีการจับตัวเป็นแพลอยอยู่บนกรดอะซีติก

เมื่อพิจารณาจากปัญหาในการเกาะติดกันเป็นแพของเม็ดยางพาราผสมสารเคมีที่ขึ้นรูปได้ด้วยไฟฟ้าสถิตเมื่อตกลงบนกรดอะซีติก พบว่าปัญหาเกิดจากการที่เมื่อหยดของน้ำยางพาราที่พุ่งออกมาด้วยแรงทางไฟฟ้าตกลงบนกรดอะซีติก หยดของน้ำยางจะเกิดการเสียสภาพและเกิดการจับตัวเป็นก้อน เนื่องจากอิออนบวกของไฮโดรเจน (H^+) จากกรดอะซีติกจะทำลายอนุมูลอิสระของคาร์บอกซีเลตที่อยู่รอบๆ อนุภาคยาง อนุภาคยางจะรวมตัวและจับเป็นก้อน ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ เม็ดยางที่เกิดการจับตัวนั้นจะเกิดการจับตัวกับเม็ดยางที่อยู่ข้างเคียงเกิดการจับตัวเรียงกันเป็นแพ ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเม็ดยางในรูปแบบเม็ดเดี่ยวๆ ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในการนำไปใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์

ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหาก็คือ จะต้องทำให้เม็ดยางเกิดการจับตัวหรือแข็งตัวเมื่อตกลงบนกรดอะซีติก ไม่สามารถจับตัวกับเม็ดยางข้างเคียงได้ ซึ่งวิธีหนึ่งที่นิยมในการป้องกันไม่ให้สารเกาะกันก็คือ การใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อห่อหุ้มผิวของเม็ดยางไว้ ทำให้เม็ดยางอยู่ในรูปของสารแขวนลอย และไม่สามารถจับกับเม็ดยางข้างเคียงได้ เมื่อพิจารณาจากสภาพแขวนลอยของน้ำยาง เป็นที่ทราบกันดีว่าอนุภาคของยางห่อหุ้มด้วยโปรตีน ซึ่งชั้นโปรตีนนี้จะป้องกันไม่ให้อนุภาคมารวมกันและจับตัวกันเป็นก้อน นอกจากชั้นโปรตีนจะห่อหุ้ม ทำหน้าที่รักษาสถานการณ์เป็นของเหลวให้น้ำยางแล้ว ในชั้นโปรตีนนี้ยังมีอนุภาคลบของคาร์บอกซีเลต (Carboxylate, $RCOO^-$) ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักกันระหว่างอนุภาคยาง การที่อนุภาคของยางมีอนุภาคลบของคาร์บอกซีเลตห่อหุ้มอยู่เมื่อสัมผัสกับกรดอะซีติก จะทำให้อนุภาคลบถูกทำลาย ทำให้น้ำยางเกิดการเสียสภาพและจับตัวเป็นก้อน

ในการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำยางกลับมารวมตัวกันได้จะต้องเลือกชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุบวกอยู่ในส่วนหัว เพราะประจุบวกของสารลดแรงตึงผิวน่าจะยิ่งเร่งให้อนุภาคของยางที่มีประจุลบจับตัวกันเร็วขึ้น เมื่อพิจารณาจากสารลดแรงตึงผิวประเภทต่างๆ พบว่าสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมควรจะเป็นชนิดที่มีประจุลบหรือไม่มีประจุ จากศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องแล้วทำให้สามารถเลือกชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่น่าจะเหมาะสมในการใช้ในการช่วยในการกระจายตัวของเม็ดยาง คือ Nonidet P40 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และโซเดียม โดเดคซิล ซัลเฟต (SDS) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อยืนยันทฤษฎีดังกล่าวจะมีการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกด้วยเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ โดยเลือกใช้ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)

นอกเหนือจากการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดเพื่อช่วยในการกระจายตัวของเม็ดยางในกรดอะซีติกแล้ว ยังเลือกใช้น้ำมันละหุ่งเติมลงในกรดอะซีติกเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารลดแรงตึงผิวด้วย โดยสาเหตุที่เลือกใช้น้ำน้ำมันละหุ่งนั้น เนื่องจากมีรายงานการใช้น้ำมันละหุ่งในการผลิตยางครัมป์ ซึ่งเป็นการผลิตผงยางขนาดเล็ก 20-40 เมชจากเศษยางวัลคาไนซ์ โดยน้ำมันละหุ่งจะช่วยในการกระจายตัวของผงยางวัลคาไนซ์ไม่ให้

ติดกัน ซึ่งก็น่าจะช่วยในการกระจายตัวของผงยางที่ขึ้นด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้เช่นกัน นอกจากนี้การเติมน้ำมันลงในของเหลวที่มีความเป็นขั้วเช่นกรด หรือน้ำ น้ำมันจะแยกชั้นออกมาเป็นฟิล์มลอยอยู่บนผิวของของเหลว เมื่อหยดของยางพาราตกลงมา ฟิล์มของน้ำมันก็จะห่อหุ้มเม็ดยางเอาไว้ไม่ให้ติดกับเม็ดยางข้างเคียงได้

งานวิจัยนี้อาจจะยังไม่สามารถแข่งขันได้ในแง่เศรษฐศาสตร์ เพราะว่าในกระบวนการขึ้นรูปด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้ในปริมาณมากๆ ได้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ยังอาจต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนานถ้าหากต้องการผลิตในปริมาณที่มาก แต่งานวิจัยนี้ก็จะเป็นการเปิดประตูงานวิจัยในการใช้เทคนิคใหม่ๆ ในการเตรียมยางสำหรับการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ได้

วัตถุประสงค์

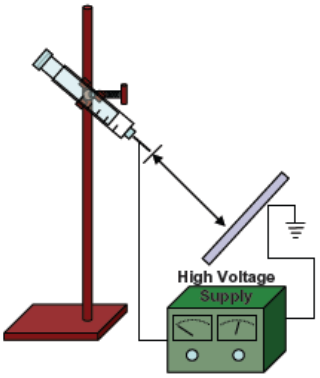
1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมผงยางพาราขนาดไมโครเมตรด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ไม่ติดกัน
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อลักษณะของผงยางพาราที่ขึ้นรูปได้

ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัยและผลงานที่เกี่ยวข้อง

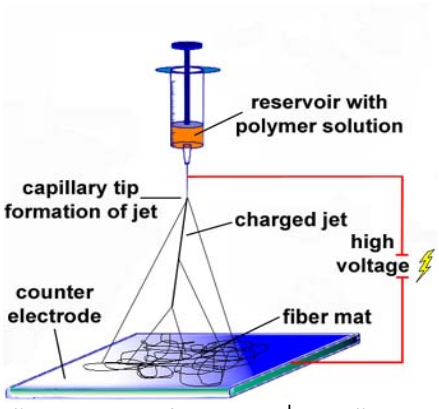
การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เป็นวิธีในการผลิตเส้นใยที่แตกต่างจากวิธีผลิตเส้นใยอื่น คือกระบวนการนี้จะใช้แรงทางไฟฟ้าแทนแรงทางกล โดยพอลิเมอร์เหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสารละลาย หรือสารหลอมเหลวที่อยู่ในรูขนาดเล็ก จะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยสนามไฟฟ้าความแรงสูง เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น เมื่อมีมากพอถึงขั้นหนึ่งก็จะไปเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์เหลวได้ เส้นพอลิเมอร์เหลวก็จะถูกฉีดออกมาและจะเปลี่ยนเป็นเส้นใย โดยการระเหยออกของตัวทำละลาย หรือโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม เส้นใยขนาดเล็กจะมากองรวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบบนแผ่นรอง (Collector) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นแบบเส้นใยไม่ถักทอ (Non-woven) โดยในกระบวนขึ้นรูปจะมีการต่อขั้วประจุไฟฟ้าขั้วหนึ่งเข้ากับสารละลายพอลิเมอร์ และอีกขั้วประจุไฟฟ้าจะต่อเข้ากับแผ่นรอง โดยที่แผ่นรองนี้ต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งส่วนมากแผ่นรองจะต่อกับสายดิน เมื่อเริ่มให้ประจุไฟฟ้ากับสารละลาย ประจุจะเคลื่อนไปบริเวณพื้นผิวของสารละลาย เมื่อแรงของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หยดของเหลวที่ปลายสุดของคาปิลลารีจะเปลี่ยนรูปร่างจากครึ่งวงกลมเป็นทรงกรวย (Taylor cone) [1]

เมื่อเพิ่มความแรงของสนามไฟฟ้ามากขึ้นจะส่งผลให้แรงทางไฟฟ้ามีค่ามากกว่าแรงตึงผิวและทำให้ของเหลวพุ่งออกจากปลาย Taylor cone สารละลายพอลิเมอร์ที่พุ่งออกมาจะเกิดความไม่เสถียรและเกิดการยืดตัวทำลำของเหลว (Jet) ยาวขึ้นและเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลง ขณะเดียวกับที่ตัวทำละลายระเหยออกไปเหลือไว้แต่เส้นใยพอลิเมอร์ ซึ่งเส้นใยที่ได้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร

การขึ้นรูปเส้นใยสามารถทำได้โดยการใช้ Power Supply เป็นตัวกำเนิดศักย์ไฟฟ้า สามารถให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0-50 kV โดยที่ขั้วลบจะต่อเข้ากับแผ่นรองที่เป็นแผ่นอลูมิเนียม (Aluminium foil) ซึ่งนำไฟฟ้าได้เพื่อให้ครบวงจรในการเกิดศักย์ไฟฟ้า ส่วนขั้วบวกจะต่อเข้าที่ปลายของคาปิลลารีซึ่งบรรจุสารละลายพอลิเมอร์อยู่ เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักกันระหว่างประจุ เมื่อมีค่ามากจนถึงค่าหนึ่งที่สามารถเอาชนะแรงตึงผิวของสารละลายพอลิเมอร์ที่อยู่ในคาปิลลารีได้ เส้นพอลิเมอร์ก็จะถูกฉีดออกมาและเมื่อตัวทำละลายระเหยออกหรือมีการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อม เส้นพอลิเมอร์ก็จะเปลี่ยนเป็นเส้นใย [2-6] โดยรูปที่ 1 แสดงชุดการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ส่วนรูปที่ 2 แสดงกลไกการผลิตเส้นใยด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 1 ชุดการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต



รูปที่ 2 กลไกการผลิตเส้นใยด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

ชุดการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่แสดงในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนกำเนิดไฟฟ้า (High voltage supply) ซึ่งเป็นตัวทำให้มีสนามไฟฟ้าสถิตในระบบ ส่วนที่ 2 คือส่วนที่บรรจุสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งจะต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า และส่วนที่ 3 คือตัวรองรับ (Counter electrode) ซึ่งจะต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเช่นกัน เมื่อเปิดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิตขึ้น แล้วสามารถปั่นเส้นใยพอลิเมอร์ด้วยกระแสไฟฟ้าสถิตได้

ลักษณะของเส้นใยที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเช่น ขนาด รูปทรงและความหนาแน่นของเส้นใย รวมทั้งการเกิดเม็ดบนเส้นใยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้ [7-9]

1. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสารละลาย เช่น ความหนืด การนำไฟฟ้าและแรงตึงผิว ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของพอลิเมอร์และตัวทำละลาย

- *น้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของพอลิเมอร์:* ทำให้ตัวทำละลายที่นำมาใช้นั้นย่อมแตกต่างกันไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ทำให้สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป

- *สมบัติของสารละลาย เช่น ความหนืด การนำไฟฟ้า แรงตึงผิว:* ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการผลิตพอลิเมอร์นาโนไฟเบอร์แต่ละชนิดนั้นแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้นเส้นใยที่ได้จากการขึ้นรูปจะมีขนาดใหญ่ และยังพบอีกว่าการทำให้สารละลายมีความหนาแน่นประจุ (Charge density) สูงขึ้นจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง

2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมในระหว่างการปั่นเส้นใย

3. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ระยะระหว่าง Tip กับ Collector และเวลาในการปั่นเส้นใย

- *ความต่างศักย์ไฟฟ้า:* จะพบว่าเมื่อให้ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง

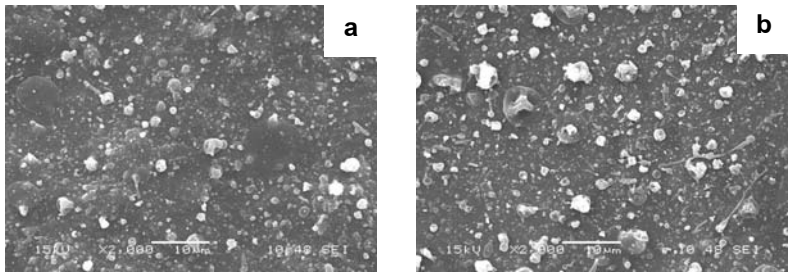
- *ระยะห่างระหว่างคาปิลลารีกับแผ่นรองรับ:* จะพบว่าเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างคาปิลลารีกับแผ่นรองให้มากขึ้น จะทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ ระยะห่างระหว่างคาปิลลารีและความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์นั้น ล้วนมีผลต่อขนาดของเส้นใยนาโนไฟเบอร์ที่ได้ จะพบว่าขนาดของเส้นใยจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายและอัตราการไหล นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเส้นใยจะเล็กลงเมื่อเพิ่มความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ

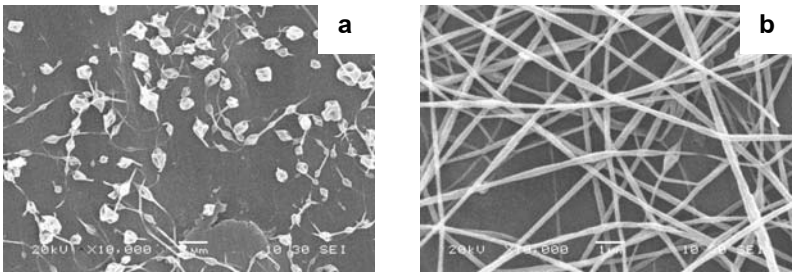
เส้นใยที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ได้ไม่ว่าจะเป็นด้านการกรองหรือด้านการแพทย์ โดยเฉพาะทางการแพทย์นั้น สามารถนำไปใช้เป็นโครงร่างรองรับเนื้อเยื่อ (Tissue template) วัสดุปิดแผล (Wound dressing) หรือใช้เป็นวัสดุปลดปล่อยยา

(Drug releasing agent) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการปั่นเส้นใยด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น ส่วนมากจะเน้นไปทางวัสดุสังเคราะห์ เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) พอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide) แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำยางพารายังมีไม่มากนัก

ปัญหาสำคัญในการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตคือ ความสามารถในการเกิดเป็นเส้นใย พอลิเมอร์ไม่ทุกชนิดที่สามารถกลายเป็นเส้นใยได้เมื่อผ่านกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต เช่น โปรตีนเข้มข้นจากถั่วเหลืองยังไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าลักษณะโปรตีนเข้มข้นจากถั่วเหลืองจะมีลักษณะกลมเป็นผงขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรเมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยไฟฟ้าสถิต [10] นอกจากนี้ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะสามารถปั่นขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้แต่ก็ต้องมีสภาวะที่เหมาะสม เช่น ความเข้มข้นหรือค่าความต่างศักย์ในการปั่นเส้นใย ไม่เช่นนั้นก็จะได้หยดหรือผงขนาดเล็กเช่นกัน ดังรูปที่ 4 [10]

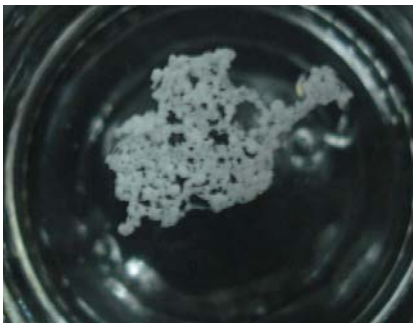


รูปที่ 3. ลักษณะของโปรตีนเข้มข้นจากถั่วเหลืองที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยปั่นด้วยเครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตแบบ Positive ความต่างศักย์ 25 kV ที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตรเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งโปรตีนเข้มข้นจากถั่วเหลืองละลายใน 95% กรดอะซิติกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ a) 4% w/w และ b) 6% w/w ที่กำลังขยาย 2,000x



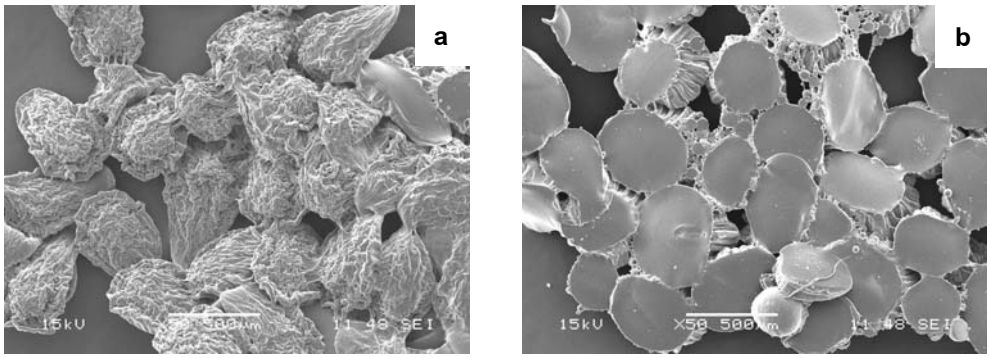
รูปที่ 4. ลักษณะของเส้นใยเซอินที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ความต่างศักย์ 10 kV ที่ระยะ 13 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 5 นาที ที่ความเข้มข้นต่างกัน (a) 20 wt% (b) 25 wt% ที่กำลังขยาย 10,000x

จากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแบบปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตทำให้มองเห็นศักยภาพของกระบวนการดังกล่าวว่าสามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปผงยางขนาดนาโนได้โดยการปรับเปลี่ยนสภาวะในการขึ้นรูปไม่ว่าจะเป็นความเข้มข้นของน้ำยางพารา ความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือระยะห่างระหว่างคาปิลลารีกับแผ่นรองรับ ซึ่งคาดว่าจะการเกิดผงยางพาราขนาดนาโนน่าจะเกิดได้ง่ายกว่า เนื่องจากก่อนที่พอลิเมอร์จะกลายเป็นเส้นใยฟุ้ง ออกมาและตกลงบนตัวรองรับ พอลิเมอร์จะอยู่ในรูปของทรงกลมและตกลงบนตัวรองรับเช่นกัน ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเกิดได้ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์หรือความต่างศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ที่มีค่าต่ำกว่าการเกิดเส้นใย แต่ในงานวิจัยที่ได้รับทุนวิจัย SPR 51 เรื่อง “**การศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมผงยางพาราขนาดนาโนด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์**” ให้ผลดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะของผงยางพาราผสมสารเคมีที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเมื่อตกลงบนกรดอะซีติกเข้มข้น

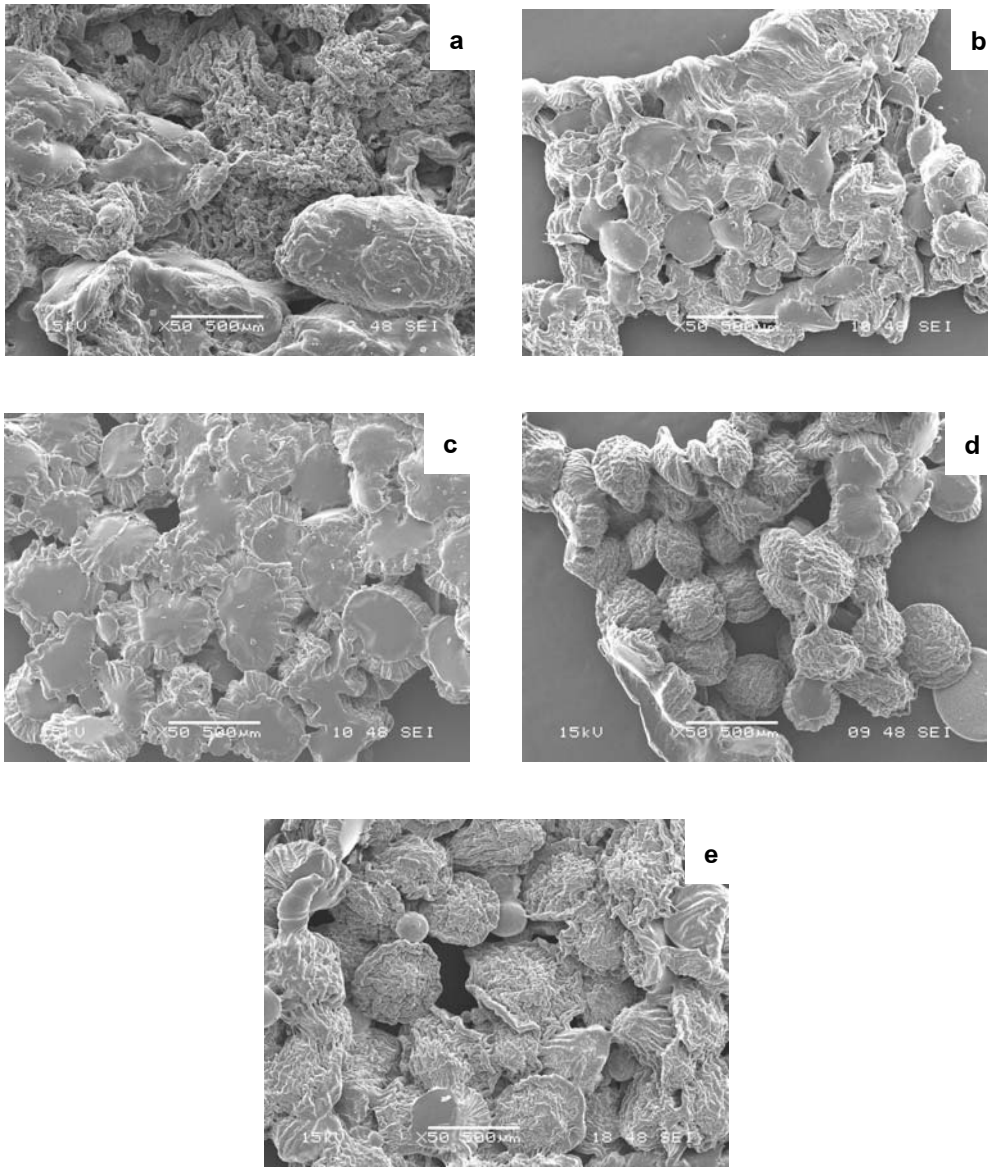
จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่อทำการปั่นน้ำยางพาราผสมสารเคมีด้วยไฟฟ้าสถิตและปล่อยให้ตกลงบนกรดอะซีติก พบว่าน้ำยางพาราผสมสารเคมีเกิดการแข็งตัว ในขณะเดียวกันเนื่องจากแรงทางไฟฟ้าทำให้น้ำยางพาราผสมสารเคมีจัดเรียงตัวอยู่ในรูปทรงกลมและหลุดออกจากปลายเข็ม เมื่อตกลงบนกรดอะซีติกเข้มข้น น้ำยางพาราจะเสียสภาพและจับตัวแข็งเป็นทรงกลมได้ เนื่องจากกรดอะซีติกสามารถสลายตัวให้อิออนบวกของไฮโดรเจน (H^+) โดย H^+ จะทำลายอนุมูลอิสระของคาร์บอกซีเลตที่อยู่รอบๆ อนุภาคยางซึ่งทำหน้าที่รักษาความเสถียรในการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยางพารา เกิดเป็นกรดไขมัน (Fatty acid) ขึ้นรอบอนุภาคของยาง ทำให้พลังยึดรอบอนุภาคยางสูญเสียไป ชั้นห่อหุ้มอนุภาคยางแฟบลง สถานการณ์เป็นสารแขวนลอยของน้ำยางจะเสียไป อนุภาคยางจะรวมตัวและจับเป็นก้อน [7] ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเม็ดน้ำยางที่ขึ้นรูปได้มีการจับตัวเป็นแพลอยอยู่บนกรดอะซีติก และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ได้ผลดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะของผงยางพาราผสมสารเคมีที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ศักย์ไฟฟ้า 23 kV ระยะห่าง 12 cm ที่ความเข้มข้น 90% a) ด้านบน (ด้านที่ไม่สัมผัสกรด) และ b) ด้านล่าง (ด้านที่สัมผัสกรด) ที่กำลังขยาย 50X

จากรูปที่ 6 พบว่าเม็ดยางพาราผสมสารเคมีมีขนาดรูปทรงเป็นครึ่งทรงกลมคือจะมีส่วนโค้งในด้านบนและเป็นส่วนเรียบในด้านล่างที่สัมผัสกับกรด นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนที่เป็นครึ่งทรงกลมค่อนข้างจะมีผิวที่ขรุขระ ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่น้ำยางพาราเกิดการคลายตัวก่อนการแข็งจึงพบลักษณะที่ขรุขระบนผิวของเม็ดยาง ในขณะที่ด้านล่างค่อนข้างเรียบ เนื่องจากเมื่อน้ำยางพาราผสมสารเคมีตกลงบนกรดอะซีติกเข้มข้นซึ่งเป็นของเหลว ซึ่งมีความตึงผิวค่อนข้างมาก ทำให้เม็ดยางที่ลักษณะแบนเรียบเหมือนผิวของของเหลว

รูปที่ 7. แสดงลักษณะของเม็ดยางพาราผสมสารเคมีที่ขึ้นรูปได้ เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำยางพารา



รูปที่ 7 ลักษณะของผงยางพาราผสมสารเคมีที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ศักย์ไฟฟ้า 23 kV ระยะห่าง 8 cm ที่ความเข้มข้น a) 50% b) 60% c) 70% d) 80% e) 90%ที่กำลังขยาย 50X

จากรูปที่ 7 พบว่าน้ำยางพาราผสมสารเคมีมีแนวโน้มเกิดเป็นทรงกลมได้เมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้น โดยในสภาวะของการขึ้นรูปที่ความต่างศักย์ 23 kV ระยะห่าง 8 cm น้ำยางจะเกิดเป็นเม็ดได้เมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 60% ขึ้นไป และมีแนวโน้มขนาดเม็ดใหญ่ขึ้นเมื่อความเข้มข้นมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ความหนืดสูง น้ำยางพาราผสมสารเคมีสามารถต้านทานการดึงยืดที่เกิดจากแรงผลักกันระหว่างประจุบนหยดได้มาก จึงสามารถฟอร์มตัวเป็นเม็ดขนาดใหญ่ขึ้นจนมีน้ำหนักที่มากพอ หยดของน้ำยางพาราจึงจะตกลงบนอุปกรณ์รองรับและได้เป็นเม็ดขนาดใหญ่ โดยเม็ดยางพาราผสมสารเคมีที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีขนาดอยู่ในระหว่าง 400-550 ไมโครเมตร

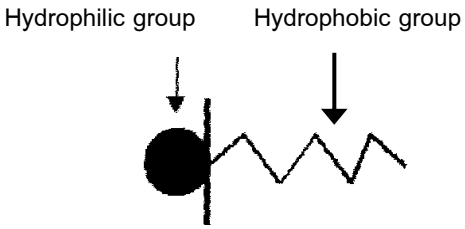
ตารางที่ 1 ค่าความหนืดของน้ำยางพาราผสมสารเคมีที่เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นต่าง ๆ

น้ำยางพาราผสมสารเคมี (%)	ค่าความหนืด (cP)	ขนาดเม็ด (μm)
50	14.0	-
60	45.0	443±72.30
70	48.3	451.6±25.86
80	114.4	467.2±28.09
90	119.0	476±16.64

*ทำการปั่นที่ศักย์ไฟฟ้า 23 kV ระยะ 8 cm

นอกจากผลของความเข้มข้นที่มีต่อความสามารถในการเกิดเป็นเม็ดของผงยางพาราผสมสารเคมีแล้ว ความต่างศักย์และระยะในการขึ้นรูปก็มีผลต่อลักษณะของเม็ดยางพาราที่ขึ้นรูปได้ด้วย ซึ่งผลงานวิจัยนี้ค่อนข้างมีปัญหาในการนำเม็ดยางพาราที่ขึ้นรูปได้ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์ เนื่องจากถึงแม้ว่าจะสามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งก็เพียงพอในการเอาไปใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์ แต่จากรูปจะเห็นได้ว่าเม็ดที่เตรียมได้ มีการเกาะติดกันเป็นแพ ไม่สามารถแยกให้เป็นเม็ดเดี่ยว ๆ ได้ซึ่งจะทำให้เมื่อนำไปเติมลงในพอลิเมอร์ ก็จะไม่สามารถเพิ่มความเหนียวได้ เพราะเม็ดยางไม่สามารถแยกกระจายตัวอยู่ในเฟสของพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากลักษณะของเป็นแพที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำเอาเม็ดยางที่เตรียมได้ไปใช้เพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการขึ้นรูปเม็ดยางด้วยไฟฟ้าสถิตให้เม็ดยางที่เตรียมได้ มีการแยกออกเป็นเม็ดเดี่ยว ๆ แทนที่จะติดกันเป็นแพดังงานวิจัยปีที่ผ่านมา

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารที่มีสมบัติในการดูดซับพื้นผิวระหว่างเฟสทำให้แรงตึงผิว (Surface tension) ของสารละลายลดต่ำลง สารลดแรงตึงผิวมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เป็นส่วนหัวและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เป็นส่วนราง ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวชอบน้ำจึงละลายน้ำได้ ส่วนหางจะเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ซึ่งจะเป็นโซ่ยาวสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ไฮโดรคาร์บอน ฟลูออโรคาร์บอนและสารพอลิเมอร์พวกซิลิโคน [11]



รูปที่ 8. โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวแบ่งเป็น 4 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามธรรมชาติของส่วนหัวสามารถอธิบายย่อ ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. **แอนไอออนิก** (Anionic surfactant) ส่วนหัวเป็นประจุลบ เช่น $RCOO^- Na^+$ (Alkylbenzene sulfonate)
2. **แคทไอออนิก** (Cationic surfactant) ส่วนหัวเป็นประจุบวก เช่น $RNH_3^+Cl^-$ (Salt of a long – chain amine), $RN(CH_3)_3^+Cl^-$ (Quaternary ammonium chloride)

3. **นอนไอออนิก** (Nonionic surfactant) ส่วนหัวไม่มีประจุ เช่น $RCOOCH_2CHOHCH_2OH$ (Monoglyceride of long–chain fatty acid), $RC_6H_4(OC_2H_4)_xOH$ (Polyoxyethylenated aldylphenol)
4. **สวิตเตอร์ไอออนิก** (Zwitterionic surfactant) ส่วนหัวมีทั้งประจุลบและบวก เช่น $RN^+H_2CH_2COO^-$ (Long – chainamino acid), $RN^+(CH_3)_2CH_2CH_2SO_3$ (Sulfobetaine)

นอกเหนือจากชนิดของประจุบริเวณส่วนหัวจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของสารลดแรงตึงผิวแล้ว ความยาวของส่วนที่ไม่ชอบน้ำก็มีผลอย่างมาก โดยถ้าหากสารลดแรงตึงผิวที่มีความยาวของส่วนที่ไม่ชอบน้ำมากขึ้นก็จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย [11]

การใช้งานสารลดแรงตึงผิวที่สำคัญคือ ช่วยการละลายของสารอินทรีย์ในน้ำในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสี การเคลือบกระดาษ การตกแต่งเส้นใย หนัง เป็นต้น การช่วยการละลายนั้นมีกลไกทำให้เกิดเป็นอิมัลชันซึ่งมี 2 แบบ คือ

- แบบอิมัลชันของสารอินทรีย์ในน้ำ (Oil in water emulsion: O/W) ลักษณะเป็นสารขุ่นใส แขวนลอย นำไฟฟ้าได้ แบบนี้จะเสถียรเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวที่ละลายน้ำได้ดี
- แบบอิมัลชันของน้ำในสารอินทรีย์ (Water in oil emulsion: W/O) ลักษณะเป็นสารขุ่นขาว แขวนลอย นำไฟฟ้าไม่ได้ แบบนี้จะเสถียรเมื่อใช้สารลดแรงตึงผิวที่ละลายในสารอินทรีย์ได้

ผลงานที่เกี่ยวข้อง

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electrospinning) เป็นกระบวนการที่ใช้เตรียมเส้นใยขนาดเล็ก เส้นใยที่เตรียมได้โดยทั่วไปจะมีขนาดอยู่ในช่วง 100 นาโนเมตรจนถึงหลายไมโครเมตร โดยในกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะใช้แรงทางไฟฟ้าทำให้เกิดการยืดตัวของสารละลายพอลิเมอร์ เส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นใยที่ไม่ได้ทอและมีความพรุนสูง สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตในการปั่นน้ำยางข้นและน้ำยางผสมสารเคมีให้เป็นเม็ดขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ซึ่งน้ำยางพาราจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความยืดหยุ่น ความเหนียว และความต้านทานต่อการขัดถูสูง เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

H. Fong และคณะ 1999 [8] ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเกิดเม็ดบนเส้นใยของพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Polyethylene oxide, PEO) ที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยการละลาย PEO ในตัวทำละลายต่างๆกันได้แก่ น้ำกลั่น โซเดียมคลอไรด์กับน้ำกลั่น และ น้ำกลั่นกับเอทธานอล โดยจากการทดลองจะพบว่าปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดเม็ดขึ้นบนเส้นใยไฟเบอร์ได้แก่ ความหนืด ความหนาแน่นของประจุ (Net charge density) และความตึงผิว โดยเมื่อเพิ่มความหนืด หรือค่าความหนาแน่นของประจุ และลดแรงตึงผิวจะทำให้เกิดเม็ดน้อยลง นอกจากนี้การเพิ่มความหนาแน่นของประจุจะทำให้ขนาดของเส้นใยลดลง

J. M. Deitzel และ คณะ 2001 [9] ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยโดยกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งได้มีการควบคุมตัวแปรต่างๆในการทดลองดังนี้ ความต่างศักย์ ความเข้มข้น อัตราการป้อน ความหนืด และระยะห่างระหว่างปลายหัวฉีดกับตัวรองรับ ซึ่งกระบวนการนี้จะมีการเพิ่มระบบสเปรย์ ในระบบซึ่งจะช่วยเพิ่มการยืดของเส้นใยในระหว่างการฉีดเส้นใยลงบนตัวรองรับ

R.V.N. Krishnappa และคณะ 2003 [12] ศึกษาผลระหว่างค่า Electrostatic forces กับ แรงตึงผิว พบว่าจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ผิวของสารละลายพอลิเมอร์ที่เป็นหยดเล็กๆ โดยแรงตึงผิวจะควบคุมการจำกัดพื้นที่ผิวโดยการสร้างเป็นรูปทรงกลม ส่วน Electrostatic tension จะควบคุมให้ความหนาแน่นเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (เปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิว การประทะนี้จะเกิดขึ้นระหว่างการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ตัวทำละลายพอลิเมอร์เริ่มระเหยกลายเป็นไอ ทำให้เกิดการเพิ่มของความหนืดของพอลิเมอร์หยดเล็กๆเป็นอย่างมาก การเพิ่มขึ้นของความหนืดจะเป็นการรักษาระดับความเร็วในการเปลี่ยนรูปร่างของหยด

สารละลายพอลิเมอร์ ดังนั้น แรงตึงผิว Electrostatics และความหนืด ล้วนแต่เป็นตัวกำหนดรูปร่างและโครงสร้างของวัสดุ

K.H. Lee และคณะ 2003 [13] ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเม็ด บนเส้นใยพอลิสไตรีนที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยปัจจัยที่ศึกษา คือ ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับตัวรองรับ (TCD) และชนิดของตัวทำละลาย ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของเม็ดบนเส้นใย คือที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 15 wt% จะทำให้เกิดเม็ดบนเส้นใยและทำให้เกิดเส้นใยที่มีลักษณะไม่สมบูรณ์เนื่องมาจากค่าความหนืดที่ต่ำ แต่ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์สูงกว่า 15 wt% จะไม่พบเม็ดเกิดขึ้นบนเส้นใยเลย ส่วนค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 kV จะทำให้เกิดเม็ดน้อยที่สุด และค่าของ TCD จะส่งผลต่อขนาดของเม็ดบนเส้นใย โดยถ้าระยะของ TCD ยิ่งห่างกันก็ยิ่งทำให้เม็ดบนเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นเพราะแรงดันที่ฉีดสารละลายพอลิเมอร์มีกำลังลดลง ส่วนสารละลายไดเมทธิลฟอร์มาไมด์ช่วยให้เส้นใยปราศจากเม็ดบนเส้นใยที่มีโครงสร้างเป็นลักษณะ Half hollow sphere (HHS) ได้

Z.M. Huang และคณะ 2004 [14] ศึกษาการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของเจลาติน (Gelatin) โดยเจลาตินนี้สามารถละลายได้ดีในน้ำแต่ไม่สามารถปั่นเป็นเส้นใยโดยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้ แต่จะเข้ากันได้ดีกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่แตกต่างกันซึ่งก็คือ 2,2,2-ไตรฟลูออโรเอทธานอล (2,2,2-Trifluoroethanol, TFE) ในสภาวะของสารละลาย Gelatin/TFE ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 5% หรือมากกว่า 12.5% จะปั่นเป็นเส้นใยนาโนไฟเบอร์ได้ยาก ในการทดสอบลักษณะทางกลแสดงให้เห็นว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยทั้งสอง และเม็ดบนผิวของเส้นใยมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของเส้นใยที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต เส้นใยร่างแหที่ละเอียดจะมีค่า Tensile modulus ที่สูงกว่า และ Tensile strength มากสุด อย่างไรก็ตามถ้ามีเม็ดอยู่บนผิวของเส้นใยแล้วก็จะทำให้สมบัติเปลี่ยนไป โดยร่างแหที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยที่สุด แต่มีเม็ดอยู่บนผิวของเส้นใยก็จะยังคงมีความสมบูรณ์ของสมรรถนะทางกลน้อยกว่า เส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากที่สุดแต่ปราศจากเม็ดบนเส้นใย

มณิศรา พิริยวิรุตม์และคณะ 2550 [10] ศึกษาการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของโปรตีนสกัดเข้มข้นจากถั่วเหลือง (SPI) โดยสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอะซิติก 80%-95% w/w และสารละลายกรดฟอร์มิก 80%-90% w/w แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยด้วยวิธีปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตและวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการทดลองพบว่าสิ่งที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีลักษณะเป็นเม็ดหรือหยดของสารละลายพอลิเมอร์เท่านั้น ไม่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใย โดยเม็ดที่ได้มีลักษณะต่างกัน กล่าวคือ เม็ดที่ได้จากแหล่งจ่ายที่ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นลบจะมีขนาดที่เล็กกว่าและกลมกว่าเม็ดที่ได้จากแหล่งจ่ายที่ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก และเม็ดที่ได้จากการละลาย SPI ในสารละลายกรดฟอร์มิกจะมีขนาดเล็กและกลมกว่าเม็ดที่ได้จากสารละลายกรดอะซิติก ดังนั้นหากต้องการขึ้นรูปเส้นใยจาก SPI ต้องใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นมาผสม โดยในการทดลองนี้เลือกใช้โปรตีนข้าวโพด (Zein) มาผสมกับ SPI โดยใช้ Zein ที่ 25% w/w ละลายใน 80% เอทธานอลผสมกับ SPI ที่ 5% w/w ใน 90% กรดอะซิติกและใน 90% กรดฟอร์มิกที่สัดส่วนต่างๆ พบว่าสัดส่วนที่ให้เส้นใยเป็นผลดีที่สุดคือที่ Zein/SPI:95/5 จากการปรับระยะห่างของตัวรองรับและความต่างศักย์ที่ใช้พบว่าเมื่อระยะห่างมากขึ้นเส้นใยผสมที่ได้ก็ยิ่งมีขนาดเล็กลง และเมื่อเพิ่มความต่างศักย์จะได้เส้นใยที่มีขนาดเล็กลงด้วย

H. Mamid และคณะ 2008 [15] ศึกษาผลของศักย์ไฟฟ้า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปลายเข็ม อัตราการไหลของสารละลาย และความเข้มข้นของสารละลาย ที่มีต่อขนาดของเม็ดที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปลายเข็มและอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมอัลจิเนตให้มากขึ้น ขนาดของเม็ดที่ได้จะใหญ่ขึ้น ในด้านผลของศักย์ไฟฟ้าพบว่า เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นขนาดของเม็ดที่ได้จะเล็กลง สำหรับผลของความเข้มข้นนั้นพบว่าสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้นสูงจะให้หยดของอัลจิเนตที่มีขนาดใหญ่และมีความเสถียร ผลของเวลาในการพักตัว (Relaxation time) จะมีผลต่อความกลมของเม็ดที่เกิด โดยถ้าเวลาในการพักตัวนานจะทำให้ได้เม็ดที่มีความกลมมากขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดการจับตัวกันเองของน้ำยางพาราในสภาวะต่างๆ ดังนี้

S. Kiatkamjornwong และคณะ [16] ได้มีการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Nonidet P40 ช่วยในการกระจายตัวของยางพาราในเฟสของแป้งมันสำปะหลัง เพื่อใช้ในการเตรียมคอมพอสิตโฟมของแป้งมันสำปะหลังที่มีการเติมยางพารา ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า Nonidet P40 สามารถช่วยป้องกันไม่ให้น้ำยางพาราจับตัวกันเอง และกระจายตัวได้ดีในเฟสของแป้งมันสำปะหลัง

บำรุง เลิศลอยกุลชัย [17] และพรทิพย์ ทูลจินดา [18] ได้มีการใช้ Nonidet P40 ช่วยในการเตรียมคอมพอสิตของแป้งมันสำปะหลัง/เซลลูโลส/ยางพารา และแป้งมันสำปะหลัง/ไคติน/น้ำยางพาราตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้แสดงว่า Nonidet P40 สามารถช่วยให้น้ำยางพารากระจายตัวได้ดีในเฟสของแป้ง/เซลลูโลส หรือเฟสของแป้ง/ไคติน โดยปริมาณของ Nonidet P40 ที่เหมาะสมในการเติมคือ 1.5% ของปริมาณน้ำยางพาราที่ใช้ ส่วน E. Ganjian และคณะ [19] ก็เลือกใช้ Nonidet P40 เป็นสารช่วยในการกระจายตัวของยางในคอนกรีต เพื่อศึกษาการใช้เศษยางเหลือทิ้งเป็นสารเสริมแรงในคอนกรีต

นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงการใช้น้ำมันละหุ่งปริมาณเล็กน้อย (0.7 phr) เติมลงในน้ำยางหรือยางวัลคาไนซ์เพื่อช่วยป้องกันการติดกันของเม็ดยางในกระบวนการผลิตยางครัมป์ [20]

วิธีการทดลอง

1. อุปกรณ์

- ตู้อบ (Conventional Oven) ยี่ห้อ Heraeus ชนิด UT6060
- เครื่องดูดความชื้นอัตโนมัติ (Auto desicator) รุ่น Auto C-3
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope,SEM) รุ่น JEOL JSM6830 LV
- เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Power Supply) รุ่น ES 30P-5W
- เข็มฉีดยาขนาด 1.2 x 25 มิลลิเมตร
- หลอดฉีดยาขนาด 5 cc
- ขวดแก้วขนาดเล็กบรรจุเม็ดยาง
- ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้ว
- เครื่องกวนสารละลาย รุ่น REXIM RS-4A
- อุปกรณ์รองรับถาดสแตนเลส

2. สารเคมี

- น้ำยางข้นชนิด High Ammonia (HA) 60 % และสารเคมีที่ใช้ในการทดลองผลิตโดยบริษัท ลักกี้ โฟร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 %
- สารละลายโปแตสเซียมลอเรต 20 %
- ดิสเพิสชั่นกำมะถัน 50 %
- ดิสเพิสชั่น Zinc dibutyl dithjocarbamate (ZDBC) 50 %
- ดิสเพิสชั่น Zinc -2-mercaptobenzothjazole (ZMBT) 50 %
- ดิสเพิสชั่นโลวีน็อก (สารป้องกันออกซิเดชัน) 50 %

- ดิสเพิสชั่นซิงค์ออกไซด์ 50 %
- กรดอะซิติกเข้มข้น จากบริษัท แลปสแกน เอเชีย (ประเทศไทย) จำกัด
- น้ำมันละหุ่ง pale press grade จากบริษัท D.M. Chemical and laboratory
- สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ คือ Nonidate P40 บริษัท Fluka analytical
- สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุลบ คือ Sodium dodecyl sulphate (SDS) บริษัท Fluka analytical
- สารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุบวก คือ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) บริษัท Fluka analytical

3. ขั้นตอนการเตรียมน้ำยางพาราผสมสารเคมี

โดยนำน้ำยางข้นชนิด High Ammonia (HA) ที่ความเข้มข้น 60% มาทำการอบไล่น้ำในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 50 นาที เพื่อเป็นการระเหยน้ำออกจากน้ำยางข้น ซึ่งจะทำให้น้ำยางข้นที่ได้ มีปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 70% แล้วจึงนำน้ำยางพาราข้นที่ปรับความเข้มข้นเป็น 70% ไปผสมกับสารเคมีต่างๆ ตามส่วนผสมที่กำหนดดังตารางที่ 2. จากนั้นกวนจนน้ำยาง และสารเคมีรวมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 สูตรการเตรียมสารเคมีเพื่อผสมในน้ำยาง [21]

สารประกอบ	ปริมาณสารที่ใช้ (phr)
น้ำยางข้นชนิด HA 70 %	100
สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 10 %	0.5
สารละลายโปแตสเซียมลอเรต 20 %	0.4
ดิสเพิสชั่นกำมะถัน 50 %	1.5
ดิสเพิสชั่น Zinc dibutyl dithjocarbamate (ZDBC) 50 %	0.3
ดิสเพิสชั่น Zinc -2-mercaptobenzothjazole (ZMBT) 50 %	1.5
ดิสเพิสชั่นโลวีน็อก 50 %	1.0
ดิสเพิสชั่นซิงค์ออกไซด์ 50 %	2.0

4. การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตลงบนอุปกรณ์รองรับถาดสแตนเลสบรรจุกรดอะซิติกเข้มข้น

ในการปั่นขึ้นรูปผงยางพาราด้วยไฟฟ้าสถิตนั้น สามารถเตรียมเครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้ดังรูปที่ 9

รูปที่ 9 อุปกรณ์การปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตลงบนอุปกรณ์รองรับถาดสแตนเลสบรรจุกรดอะซิติกเข้มข้น

เครื่องปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องแปลงเป็นความต่างศักย์กำลังสูง (High voltage) หลอดฉีดยาสำหรับบรรจุสารละลายพอลิเมอร์ โดยตัวรองรับจะอยู่ในลักษณะของถาดที่มีสารละลายกรดอะซิติก ซึ่งจะทำให้น้ำยางที่ผ่านการปั่นได้ไฟฟ้าสถิตเกิดการจับตัว โดยจะเติมน้ำมันละหุ่งและสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ ลงในกรดอะซีติก เพื่อป้องกันการจับตัวของผงยางที่ขึ้นรูปได้ โดยปรับเปลี่ยนสารที่เติมลงในกรดอะซีติกเป็น 4 ชนิดคือ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ คือ Nonidet P40 สารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุลบ คือ Sodium dodecyl sulphate สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก คือ Cetyltrimethyl ammonium bromide และน้ำมันละหุ่ง โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของ SDS และ CTAB ที่เติมเป็น 3 ค่าคือ 2 4 และ 6% (*คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อปริมาณกรดอะซีติก) และปรับเปลี่ยนปริมาณของ Nonidet P40 และ น้ำมันละหุ่งที่เติมเป็น 3 ค่า คือ 50 75 และ 100% (*คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ต่อปริมาณกรดอะซีติก)

ในการขึ้นรูปเม็ดยางจะต้องต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับระบบโดยจะต่อโดยขั้วบวกกับ Capillary tip ที่ต่ออยู่กับหลอดฉีดยาที่บรรจุน้ำยางพาราผสมสารเคมีและขั้วลบจะต่อกับตัวรองรับ โดยจะควบคุมปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงอุปกรณ์รองรับปรับ 20 เซนติเมตร

นำน้ำยางผสมสารเคมีที่ได้เตรียมไว้แล้ว มาทำการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต โดยการใส่ลงในหลอดฉีดยาที่ต่อกับเข็มฉีดยา ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าแรงสูง โดยน้ำยางจะไหลออกจากปลายเข็มฉีดยาลงสู่ถาดสแตนเลสที่บรรจุกรดอะซิติกเข้มข้นที่ผสมสารลดแรงตึงผิว หรือน้ำมันละหุ่ง ซึ่งจะช่วยทำให้น้ำยางที่พุ่งออกมาจากเข็มฉีดยาจับตัวเป็นเม็ดขนาดเล็กและไม่ติดกัน

นำเม็ดยางที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ที่ตกลงยังอุปกรณ์รองรับถาดสแตนเลสบรรจุกรดอะซิติกเข้มข้น มาทำการผ่านน้ำสะอาดเพื่อล้างกรดออก จากนั้นเก็บเม็ดยางที่ได้ในขวดบรรจุน้ำสะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดยางเกาะตัวกันเป็นก้อน ก่อนนำไปวิเคราะห์ผล

5. การตรวจสอบหาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อเม็ดยางขนาดเล็กที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของเม็ดยางขนาดเล็กที่ได้จากน้ำยางพาราผสมสารเคมีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) มีวิธีการเตรียมชิ้นงานก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ดังนี้

5.1 นำเม็ดยางที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตที่ตกลงยังอุปกรณ์รองรับถาดสแตนเลสบรรจุกรดอะซิติกเข้มข้น มาทำการผ่านน้ำสะอาดเพื่อล้างกรดออก จากนั้นเก็บเม็ดยางที่ได้ในขวดบรรจุน้ำสะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดยางเกาะตัวกันเป็นก้อน

5.2 นำเม็ดยางที่ได้ติดลงบนสตับเพื่อนำไปทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่นJSM 6830 LV ในสภาวะสุญญากาศ 0.1 torr แต่เนื่องจากเม็ดยางที่ได้ไม่มีสมบัติการนำไฟฟ้า จึงต้องทำการเคลือบบนเม็ดยางด้วยสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้าก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ผล

ผลการวิจัย

1. ลักษณะโดยทั่วไปของเม็ดยาง

1.1 สีของเม็ดยาง

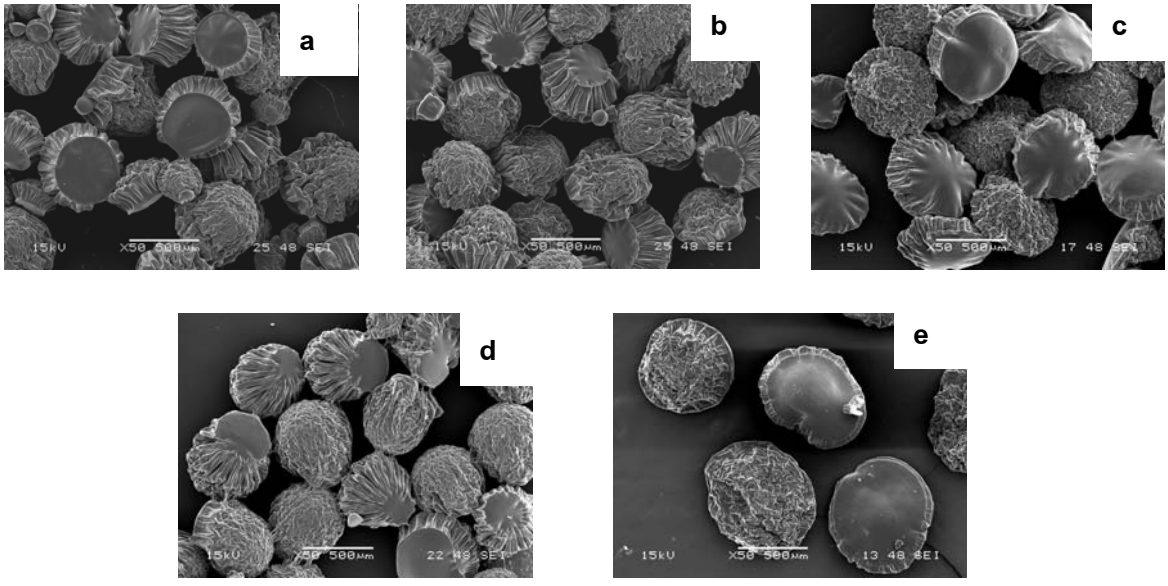
หลังกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต นำเม็ดยางที่ได้ไปทำการผ่านน้ำสะอาดเพื่อล้างกรดออก จากนั้นเก็บเม็ดยางในขวดบรรจุน้ำสะอาด เพื่อป้องกันไม่ให้เม็ดยางเกาะตัวกันเป็นก้อน สังเกตสีของเม็ดยางที่ได้ ซึ่งให้ผลดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 สีของเม็ดยางที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตจากน้ำยางพาราผสมสารเคมี

จากรูปที่ 10 พบว่าเม็ดยางที่ได้จากการปั่นน้ำยางพาราผสมสารเคมีจะมีสีขาวอมเหลือง เนื่องจากสารเคมีที่ผสมลงไป ซึ่งสารเคมีบางชนิดมีสีขาวขุ่นถึงเหลืองจึงเป็นสาเหตุให้เม็ดยางที่ได้มีสีขาวอมเหลืองตามไปด้วย

1.2. ลักษณะเม็ด

การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของเม็ดยางที่ได้จากกระบวนการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าเม็ดยางมีลักษณะกลมถึงรี ซึ่งการเติมน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซิติก จะทำให้เม็ดที่ได้จะไม่ติดกันเป็นแพ แต่แยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ แต่การเติมสารลดแรงตึงผิวลงในกรดอะซิติก ยังคงให้เม็ดที่ติดกันเป็นแพและไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แสดงดังรูปที่ 11



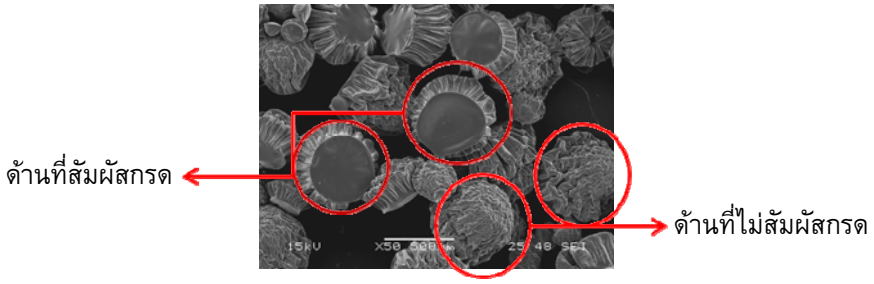
รูปที่ 11. รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X ของน้ำยางพาราผสมสารเคมีความเข้มข้น 70% ศักย์ไฟฟ้า 25 kV ระยะห่าง 35 cm a) ไม่ผสมสารลดแรงตึงผิว b) CTAB c) Nonidate P40 d) SDS และ e) น้ำมันละหุ่ง

จากรูปที่ 11 การที่เม็ดยางซึ่งได้จากน้ำยางผสมสารเคมี ความเข้มข้น 70% มีลักษณะเชื่อมติดกันเป็นแพ เนื่องจากเม็ดยางแต่ละเม็ดจะมีประจุลบของคาร์บอกซิเลต ซึ่งเมื่อตกลงบนกรดอะซิติก กรดจะสลายตัวให้อิ

ออน ของไฮโดรเจนไปทำลายชั้นห่อหุ้มของเม็ดยางซึ่งมีอนุมูลอิสระของคาร์บอกซิเลตอยู่รอบๆ โดยจะทำให้เม็ดยางไม่มีความเสถียร จึงเกิดการจับตัวกันและเหนียวติดกันเป็นแพ

1.3 ลักษณะพื้นผิวของเม็ดยาง

จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเม็ดยางพบว่าลักษณะพื้นผิวของเม็ดยางด้านที่สัมผัสกับอากาศจะมีลักษณะขรุขระ ส่วนด้านที่สัมผัสกับกรดอะซิติกจะมีผิวเรียบ แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50X ใช้น้ำยางพาราผสมสารเคมีความเข้มข้น 70% ศักย์ไฟฟ้า 25 kV ระยะห่าง 35 cm

จากรูปที่ 12 การที่ผิวของเม็ดยางมีทั้งเรียบและขรุขระ เนื่องจากน้ำยางมีความหนาแน่นน้อยกว่ากรดอะซิติก อนุภาคของยางจึงลอยอยู่บนผิวหน้าของของเหลว จึงมีทั้งด้านที่สัมผัสและไม่สัมผัสกับกรดอะซิติก โดยด้านบนของเม็ดยางเป็นด้านที่ไม่สัมผัสกับกรด พื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระ เนื่องมาจากเมื่อเม็ดยางสัมผัสกับอากาศ ทำให้มีเวลาในการพักตัว (Relaxation) อีกทั้งเนื่องจากแรงตึงผิวของน้ำยางเองจึงเกิดลักษณะที่เป็นผิวโค้งและขรุขระ ส่วนด้านล่างของเม็ดจะเป็นด้านที่สัมผัสกับกรดอะซิติก ซึ่งพื้นผิวทุกตำแหน่งจะสัมผัสกับกรดเท่ากันและไม่เจอกับอากาศ ผิวที่ได้จึงเรียบ

2. ผลของสารลดแรงตึงผิวต่อการกระจายของเม็ดยางพาราขนาดเล็กที่ขึ้นรูปด้วยวิธีปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต

2.1 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุลบ

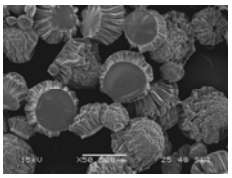
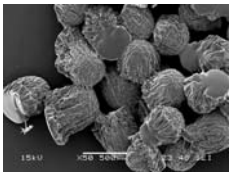
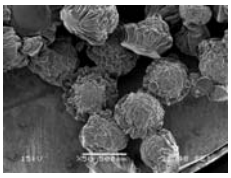
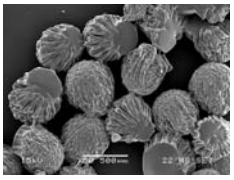
เมื่อเปรียบเทียบทุกความเข้มข้นของ SDS จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของ SDS สูงขึ้น เม็ดยางที่ได้จะไม่แยกออกจากกัน และที่ความเข้มข้น 2%, 6% จะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ที่ความเข้มข้น 4% จะมีขนาดเล็กกว่า แสดงดังตารางที่ 1

เม็ดยางที่ได้จะยังไม่แยกออกจากกัน แต่เม็ดยางติดกันน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ยังไม่มีการใช้ SDS ในการรองรับเม็ดยาง สาเหตุเนื่องมาจากด้วยความเป็นประจุลบจึงไปผลักเม็ดยางออกจากกัน เม็ดยางจึงมีโอกาสชนกับเม็ดอื่นได้ ทำให้เม็ดยางเกิดการติดกันและหากความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากพอจนถึงจุด Critical Micelle Concentration (CMC) ที่จะทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดเป็น Micelle ห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ เพราะส่วนหางของ Micelle ไม่มีขั้ว ก็จะไปดึงดูดเม็ดยางซึ่งไม่มีขั้วเข้ามาไว้วงในของ Micelle แต่ด้วยความเข้มข้น SDS ที่ไม่มากพอถึงจุด CMC จึงไปผลักเม็ดยางออกจากตัวเองเท่านั้น ไม่ไปล้อมรอบเม็ดยาง

นอกจากนี้จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของ SDS เพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดยางมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวของกรดอะซิติกจะน้อยลง เม็ดยางจึงมีโอกาสขยายตัวได้มากกว่า แต่ด้วยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มากนัก จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของขนาดเม็ดเด่นชัดนัก หากทำการทดลองที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่านี้ อาจทำให้เห็นผลได้ชัดเจนว่า ขนาดของ

เม็ดยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจริงหรือไม่ แต่ด้วยความสามารถในการละลายของ SDS เมื่อเกิน 6%w/v จะไม่สามารถละลายเข้ากับกรดอะซิติกได้ จึงทำการทดลองได้เพียงเท่านี้

ตารางที่ 3 ผลการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของน้ำยางข้น 70 % ผสมสารเคมีลงในกรดอะซิติกผสมกับ SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงอุปกรณ์รองรับ 35 cm เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ความเข้มข้นของ SDS (%w/v)	ภาพถ่ายจาก SEM		เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
	กำลังขยาย (50 X)	รูปร่างและลักษณะ	
0		เป็นเม็ดค่อนข้างกลม แต่ไม่สมมาตร ขนาดไม่สม่ำเสมอ ผิวขรุขระ บางเม็ดเชื่อมติดกัน	461±80
2		รูปร่างไม่สมมาตร มีบางเม็ดกลมสูงต่ำต่างกันไป และบางเม็ดเชื่อมติดกัน ผิวขรุขระ	465±76
4		เป็นเม็ดกลม บางเม็ดมีขนาดเล็กมาก พื้นผิวไม่เรียบ	482±74
6		เป็นเม็ดกลม ค่อนข้างสมมาตร ขนาดใกล้เคียงกัน ผิวขรุขระ บางเม็ดเชื่อมติดกัน	547±71

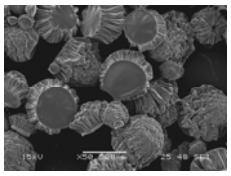
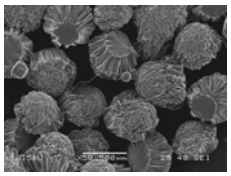
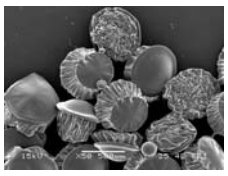
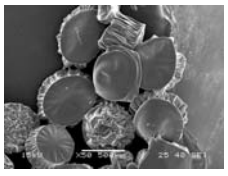
2.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุบวกที่มีต่อขนาดและการกระจายของเม็ดยาง

เมื่อเปรียบเทียบทุกความเข้มข้นของ CTAB จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของ CTAB สูงขึ้น เม็ดยางที่ได้จะไม่กระจายตัวออกจากกัน และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ขนาดจะใหญ่ขึ้น แสดงดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่า เม็ดยางที่ได้จะยังไม่แยกออกจากกัน แต่เม็ดยางติดกันน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ยังไม่มีการใช้ CTAB ในการรองรับเม็ดยาง สาเหตุเนื่องมาจากด้วยความเป็นประจุบวก เกิดแรงดึงดูดกันของสารลดแรงตึงผิวกับเม็ดยาง เม็ดยางจึงมีโอกาสเจอกัน ทำให้เม็ดยางเกิดการติดกันได้ และเนื่องด้วยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มากพอจนถึงจุด Critical Micelle Concentration (CMC) ที่จะทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดเป็น Micelle ห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ดังรูปที่ 14 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของ CTAB เพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดยางมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวของน้ำกรดจะน้อยลง เม็ดยางจึงมีโอกาสขยายตัวได้มากกว่า แต่ด้วยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มากนัก จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของขนาดเม็ดมากนัก หากทำการทดลองที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่านี้ อาจทำให้เห็นผลได้ชัดเจนว่า ขนาดของเม็ดยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจริงหรือไม่ แต่ด้วย

ความสามารถในการละลายของ CTAB เมื่อเกิน 6%w/v จะไม่สามารถละลายเข้ากับกรดอะซิติกได้ จึงทำการทดลองได้เพียงเท่านี้

ตารางที่ 4 ผลการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของน้ำยางข้น 70 % ผสมสารเคมีลงในกรดอะซิติกผสมกับ CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงอุปกรณ์รองรับ 35 cm เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

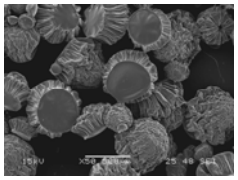
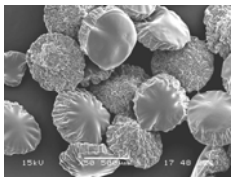
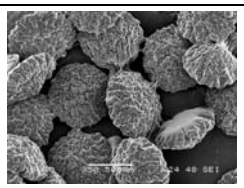
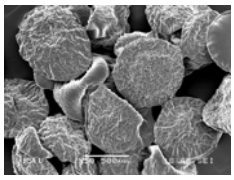
ความเข้มข้นของ CTAB (%w/v)	ภาพถ่ายจาก SEM		เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
	กำลังขยาย (50 X)	รูปร่างและลักษณะ	
0		เป็นเม็ดค่อนข้างกลม แต่ไม่สมมาตร ขนาดไม่สม่ำเสมอ ผิวขรุขระ บางเม็ดเชื่อมติดกัน	461±80
2		เป็นเม็ดกลม ขนาดใกล้เคียงกัน แต่ละเม็ดติดกัน พื้นผิวไม่เรียบ	536±40
4		เป็นเม็ดกลม แต่ละเม็ดติดกัน พื้นผิวไม่เรียบ	551±80
6		เป็นเม็ดกลม แต่ละเม็ดติดกัน พื้นผิวไม่เรียบ	604±64

2.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุที่มีต่อขนาดและการกระจายของเม็ดยาง

เมื่อเปรียบเทียบทุกความเข้มข้นของ Nonidate P40 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของ Nonidate P40 สูงขึ้น เม็ดยางที่ได้จะไม่แยกออกจากกัน และที่ความเข้มข้น 50%, 100% จะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ที่ความเข้มข้น 75% จะมีขนาดเล็กกว่า แสดงดังตารางที่ 5

ผลจากตารางที่ 5 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของ Nonidate P40 เพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดยางมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวของกรดอะซิติกจะน้อยลง เม็ดยางจึงมีโอกาสขยายตัวได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุ (SDS และ CTAB) ดังกล่าวข้างต้น พบว่าเม็ดยางที่ได้จาก Nonidate P40 มีความเป็นรูปทรงและไม่มีส่วนที่เชื่อมติดกันมากกว่า เพราะ Nonidate P40 ที่เติมลงไปนั้นทำหน้าที่เพียงแค่ลดแรงดึงดูดระหว่างผิวของเม็ดยางแต่ละเม็ดเท่านั้น ไม่ได้เกิดการผลัก หรือดูดกันจากประจุ ไม่มีการชนกันเกิดขึ้น ดังนั้นลักษณะของเม็ดที่ได้จึงมีรูปทรงกว่าของกรณีการเติม SDS และ CTAB แต่ถ้าหากความเข้มข้น Nonidate P40 เกิน100%w/v ไปเม็ดยางมีเริ่มไม่เป็นรูปทรงกลม เนื่องกรดอะซิติกถูกเจือจางไปมาก เมื่อเม็ดยางตกลงสู่ภาชนะรองรับจึงเกิดโอกาสเจอกรดได้ยาก เกิดการแข็งตัวได้ยากแล้ว ทำให้เม็ดยางเกิดการขยายตัวได้มากจนเชื่อมติดกันเป็นแพ (ไม่ได้แสดงผล)

ตารางที่ 5 ผลการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของน้ำยางข้น 70 % ผสมสารเคมีลงในกรดอะซิติกผสมกับ Nonidate P40 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงอุปกรณ์รองรับ 35 cm เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ความเข้มข้นของ Nonidate P40 (%)	ภาพถ่ายจาก SEM		เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
	กำลังขยาย (50 X)	รูปร่างและลักษณะ	
0		เป็นเม็ดค่อนข้างกลม แต่ไม่สมมาตร ขนาดไม่สม่ำเสมอ ผิวขรุขระ บางเม็ดเชื่อมติดกัน	461±80
50		เป็นเม็ดกลม ขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวไม่เรียบ	504±56
75		เป็นเม็ดกลม มีความสมมาตรมากขึ้น ขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ บางเม็ดเชื่อมติดกัน พื้นผิวไม่เรียบ	686±52
100		เป็นเม็ดขนาดใหญ่ ขนาดและรูปร่างไม่สม่ำเสมอ บางเม็ดเชื่อมติดกัน พื้นผิวไม่เรียบ	787±24

2.4 ผลของน้ำมันละหุ่งที่มีต่อขนาดและการกระจายของเม็ดยาง

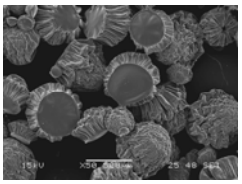
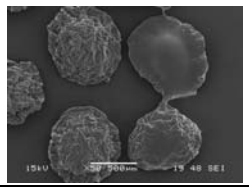
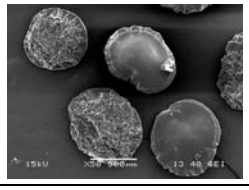
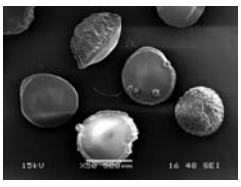
เมื่อเปรียบเทียบทุกความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่ง จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งสูงขึ้นเม็ดยางที่ได้จะมีขนาดเล็กลงและค่อนข้างกลมมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 6

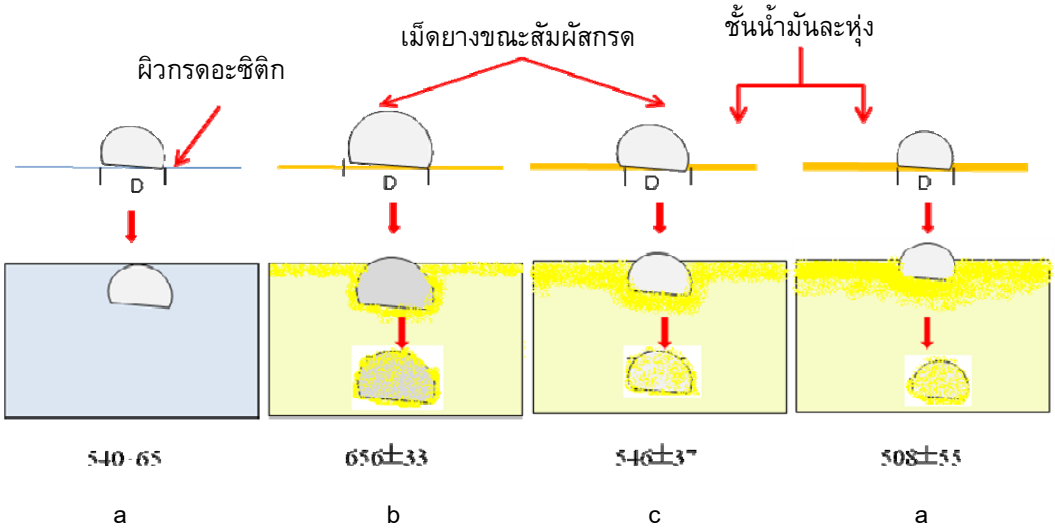
ตารางที่ 6 จะเห็นว่าเม็ดยางพาราที่ได้แยกอิสระจากกัน ไม่ติดกันเป็นแพ เนื่องจากน้ำมันละหุ่งไปห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ เม็ดยางจึงไม่เกิดการติดกัน นอกจากนี้ เมื่อผสมกรดอะซีติกกับน้ำมันละหุ่ง น้ำมันละหุ่งจะลอยอยู่บนกรดอะซิติกเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่ากรดอะซิติก จึงมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มเกิดขึ้น เมื่อเม็ดยางพาราตกลงมาสัมผัสกับน้ำมันละหุ่งที่ผสมกรดอะซิติกในภาชนะรองรับ น้ำมันละหุ่งจะห่อหุ้มเม็ดยางพาราไว้ก่อนจึงค่อยเกิดการแข็งตัวเมื่อตกลงสู่ชั้นของกรดอะติกในภายหลัง เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดยางมีแนวโน้มที่ลดลง แต่เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งมากขึ้น (เกิน 100%w/v) จะทำให้เม็ดยางจะไม่เป็นรูปทรงและเชื่อมติดกันเป็นแพ เนื่องจากเม็ดยางจะสัมผัสกับกรดอะซิติกได้ยาก เพราะชั้นฟิล์มของน้ำมันละหุ่งที่หนาเกิน

สาเหตุที่ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมีแนวโน้มลดลงแสดงได้ดังรูปที่ 13 เนื่องจากน้ำมันละหุ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่ากรดจึงแยกตัวและเกิดเป็นชั้นฟิล์มลอยตัวอยู่บนกรดอะซิติก (รูป a) เมื่อเม็ดยางที่ตกลงสู่ภาชนะรองรับที่บรรจุกรดอะซิติกอย่างเดียว จะเกิดการแข็งตัวทันที แต่เมื่อมีชั้นของน้ำมันละหุ่งเข้มข้น 50% (รูป b) เม็ดยางจะตกสู่ชั้นของน้ำมันละหุ่งก่อน ทำให้เม็ดยางมีโอกาสแผ่ขยายตัวก่อนการแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับกรดอะ

ซิติกได้มากกว่ากรณีที่ไม่มีชั้นฟิล์มของน้ำมันละหุ่ง เมื่อชั้นฟิล์มของน้ำมันละหุ่งห่อหุ้มเม็ดยางไว้แล้ว ก่อนตกลงสู่ชั้นของกรดอะซิติก จึงทำให้มีขนาดเม็ดใหญ่กว่า และหากความเข้มข้นน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้นเป็น 75% (รูป c) ชั้นฟิล์มของน้ำมันละหุ่งที่ลอยตัวอยู่บนชั้นของกรกอะซิติกก็จะหนาขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อน้ำมันละหุ่งมีความเข้มข้นมากขึ้น ย่อมมีความหนืดมากขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เม็ดยางมีโอกาสขยายตัวได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้นของน้ำมันระหุ่งต่ำ (รูป b) ทำนองเดียวกันที่น้ำมันละหุ่งความเข้มข้น 100% (รูป d) ก็ย่อมทำให้เม็ดยางมีโอกาสขยายตัวได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้น 50 และ 75% (รูป b และ c ตามลำดับ) ด้วย จึงทำให้เม็ดยางมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 ผลการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของน้ำยางข้น 70 % ผสมสารเคมีลงในกรดอะซิติกผสมกับน้ำมันละหุ่งที่ความเข้มข้นต่างๆ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 25 kV ระยะห่างจากปลายเข็มถึงอุปกรณ์รองรับ 35 cm เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่ง (%)	**ภาพถ่ายจาก SEM**		**เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)**
	กำลังขยาย (50 X)	**รูปร่างและลักษณะ**	
0		เป็นเม็ดค่อนข้างกลม แต่ไม่สมมาตร ขนาดไม่สม่ำเสมอ ผิวขรุขระ บางเม็ดเชื่อมติดกัน	461±80
50		เป็นเม็ดกลม มีความสมมาตร ขนาดสม่ำเสมอ พื้นผิวไม่เรียบ	881±70
75		เป็นเม็ดกลมและรี มีความสมมาตร ขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ พื้นผิวไม่เรียบ	850±34
100		เป็นเม็ดกลมสมมาตร ขนาดใกล้เคียงกัน พื้นผิวไม่เรียบ	640±70



รูปที่ 13 ผลของความหนาของชั้นฟิล์มน้ำมันละหุ่งที่ส่งผลต่อขนาดเม็ดยางพาราที่น้ำมันละหุ่งความเข้มข้น a) 0% b) 50% c) 75% และ d) 100%

6. วิจารณ์ผล

ในการเตรียมเม็ดยางพาราขนาดเล็กด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ได้ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ Nonidate P40, Sodium dodecyl sulphate (SDS), Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) และน้ำมันละหุ่งที่มีผลต่อการขึ้นรูป

การเติมสารลดแรงตึงผิวหรือน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซิกติกจะมีผลต่อการขึ้นรูปเม็ดยางจากน้ำยางพาราผสมสารเคมีความเข้มข้น 70 w/v% ดังนี้ การเติมน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซิติก เม็ดยางที่ได้จะแยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ หรือไม่ยึดติดกัน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการผสมกรดอะซีติกกับน้ำมันละหุ่ง น้ำมันละหุ่งจะลอยอยู่บนกรดอะซิติก เนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่ากรดอะซิติก โดยมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มเกิดขึ้น เมื่อเม็ดยางพาราตกลงมาสัมผัสกับน้ำมันละหุ่ง น้ำมันละหุ่งจะห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ก่อนแล้วเม็ดยางจึงค่อยเกิดการแข็งตัวเมื่อตกลงสู่ชั้นของกรดอะติกในภายหลัง เม็ดยางจึงไม่เกิดการติดกัน ส่วนการเติมสารลดแรงตึงผิว เม็ดยางที่ได้ยังคงยึดติดกันเป็นแพ หรือไม่แยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ เนื่องจากความเข้มข้นของสารลดแรงตึวผิวที่ไม่มากพอจนถึงจุด Critical micelle concentration (CMC) ที่จะทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดเป็น Micelle ห่อหุ้มเม็ดยางแต่ละเม็ดไว้ ทั้งนี้ยังพบอีกว่า การที่ SDS เป็นประจุลบจึงไปผลักเม็ดยางออกจากตัวเอง เม็ดยางจึงมีโอกาสชนและติดกับเม็ดอื่นได้ ส่วน CTAB เป็นประจุบวก จึงเกิดแรงดึงดูดกันของสารลดแรงตึงผิวกับเม็ดยาง เม็ดยางจึงมีโอกาสเจอกันและการที่ Nonidate P40 ไม่มีประจุ จึงทำหน้าที่เพียงลดแรงดึงดูดที่ผิวของเม็ดยางเท่านั้น โดยไม่เกิดการผลักหรือดูดกันของอนุภาค จึงทำให้เม็ดยังคงยึดติดกัน

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและน้ำมันละหุ่งที่เติมลงในกรดอะซีติกพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งให้มากขึ้น จะทำให้เม็ดยางที่ได้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากน้ำมันละหุ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่ากรด จึงแยกตัวและเกิดเป็นชั้นฟิล์มลอยตัวอยู่บนกรดอะซิติก เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น ชั้นของน้ำมันละหุ่งที่ลอยตัวอยู่บนชั้นของกรกอะซิติกก็จะหนาขึ้นเช่นกัน และน้ำมันละหุ่งที่มีความเข้มข้นมากกว่า ก็ย่อมมีความหนืดมากกว่า ทำให้เม็ดยางมีโอกาสขยายตัวได้น้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นขนาดเม็ดยางที่ได้จึงมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ SDS, CTAB, และ Nonidate P40 คือ เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น ขนาดของเม็ดที่ได้จะมี

แนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น แรงตึงผิวของกรดอะซิติกจะน้อยลง เม็ดยางจึงมีโอกาสขยายตัวได้มากกว่า แต่ด้วยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ไม่มากนัก จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของขนาดเม็ดมากนัก อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถทำการทดลองในปริมาณที่มากกว่านี้ได้ เนื่องมาจากความสามารถในการละลายของ SDS ซึ่งเมื่อความเข้มข้นเกิน 6%w/v จะไม่สามารถละลายเข้ากับกรดอะซิติกได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ CTAB ในปริมาณที่เท่ากันในการเปรียบเทียบ ส่วน Nonidate P40 เมื่อใช้ในความเข้มข้นที่มากกว่านี้ เม็ดยางจะไม่เป็นรูปทรงกลม เนื่องจากกรดอะซิติกถูกเจือจางไปมากทำให้โอกาสที่เม็ดยางจะพบกับกรดก็ยากขึ้น จึงเกิดการแข็งตัวได้ยาก

7. สรุปผล

จากการศึกษาการเตรียมเม็ดยางพาราขนาดเล็กจากน้ำยางพาราผสมสารเคมีด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตโดยควบคุมปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงอุปกรณ์รองรับเป็น 35 เซนติเมตร โดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่ต่างชนิดกันได้แก่ SDS ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุเป็นลบ Nonidet P40 ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชิดไม่มีประจุ CTAB ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวก และน้ำมันละหุ่งซึ่งเป็นสารเคลือบผิวชนิดไม่มีประจุ พบว่าที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่างกันจะให้ผลดังนี้

สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (CTAB) ทำให้ได้เม็ดยางพาราติดกันเป็นแพ และผิวของเม็ดยางเชื่อมติดกันมากกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS) อีกทั้งยังมีความกลมความสมมาตรของเม็ดยางน้อยกว่าและมีขนาดของเม็ดยางที่ใหญ่กว่าด้วย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonidate P40) จะทำให้ได้เม็ดยางที่เป็นรูปทรงกลมและสมมาตรกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุทั้งสองข้างต้น ส่วนน้ำมันละหุ่งนั้น ทำให้ได้เม็ดยางพาราที่แยกอิสระออกจากกันได้ดีที่สุด โดยน้ำมันละหุ่งที่ความเข้มข้น 100% ทำให้ได้เม็ดยางพาราที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีความกลมสมมาตรมากที่สุด รองลงมาคือ 75% และ 50% ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น ะทำให้ได้ขนาดของเม็ดยางที่เล็กลง ส่วนที่ความเข้มข้นมากหรือน้อยกว่านี้จะเม็ดยางที่ได้ติดกันและเสียรูป

8. ข้อเสนอแนะ

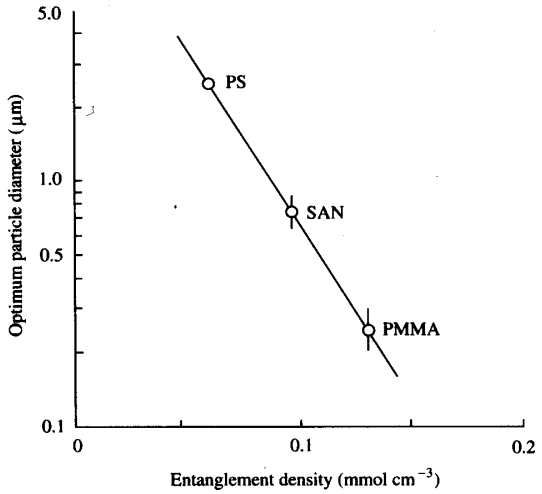
ในการขึ้นรูปเม็ดยางพาราขนาดเล็กด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตดังกล่าวข้างต้น พบว่าหากเติมน้ำมันละหุ่งลงในกรดอะซิติก เม็ดยางที่ได้มีลักษณะแยกออกจากกันเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ไม่ติดกันเป็นแพ ซึ่งสามารถนำเม็ดยางดังกล่าวไปใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์ได้ตามต้องการ ทั้งนี้ทางผู้ทำการทดลองคิดว่า หากมีการออกแบบการทดลองใหม่ เพื่อหาจุด Critical micelle concentration (CMC) ของน้ำมันละหุ่ง จะทำให้ทราบความเข้นข้นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้

งานวิจัยนี้อาจจะยังไม่สามารถแข่งขันได้ในแง่เศรษฐศาสตร์ เพราะว่าในกระบวนการขึ้นรูปด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตนี้ยังไม่สามารถขึ้นรูปได้ในปริมาณมากๆ ได้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ยังอาจต้องใช้เวลาในการขึ้นรูปนานถ้าหากต้องการผลิตในปริมาณที่มาก แต่งานวิจัยนี้ก็จะเป็นการเปิดประตูงานวิจัยในการใช้เทคนิคใหม่ๆ ในการเตรียมยางสำหรับการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ได้

สิ่งที่สำคัญที่สุดในการใช้ยางในการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ก็คือ การทำให้ขนาดของเฟสยางที่กระจายอยู่ในพอลิเมอร์มีขนาดเล็กเท่าที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งการมีขนาดเล็กจะเป็นการเพิ่มผิวสัมผัสระหว่างเฟสทั้งสอง และถ้าหากสภาวะของพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่แตกต่างกัน ขนาดของอนุภาคที่เหมาะสมในการปรับปรุงความเหนียวก็จะแตกต่างกันไปด้วย [22] โดยในรูปที่ 14. จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ ขนาดของอนุภาคยางก็จะแตกต่างกัน (ขึ้นกับความหนาแน่นในการพันกับของสายโซ่พอลิเมอร์ (Entanglement density)) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีของพอลิสไตรีนนั้น อนุภาคของยางที่

สามารถปรับปรุงความเหนียวก็ควรมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าในกรณีของสไตรีน อะคริโลไนไตรล์ โคพอลิเมอร์ (Styrene acrylonitrile copolymer, SAN) และพอลิเมทธิล เมตาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดของเม็ดยางพาราขนาดเล็กที่เตรียมได้ด้วยวิธีการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเฟสของยางในการใช้เป็นตัวปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ที่มีรายงานอยู่ โดยขนาดของเม็ดยางที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีขนาด 410-800 μm ในขณะที่ขนาดของเม็ดยางที่เหมาะสมควรมีขนาดต่ำกว่า 5 μm ทำให้เม็ดยางที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ชนิดพอลิสไตรีน สไตรีน อะคริโลไนไตรล์ โคพอลิเมอร์และพอลิเมทธิล เมตาคริเลตได้ แต่อย่างไรก็ตามเม็ดยางดังกล่าวอาจเหมาะสมกับการใช้เป็นสารปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ชนิดอื่นก็เป็นได้ ซึ่งก็ต้องศึกษาต่อไป



รูปที่ 14. ขนาดของอนุภาคยางที่เหมาะสมในการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [21]

9. เอกสารอ้างอิง

1. S. Ramkrishna, K. Fujihara, W.E. Teo, T.-C. Lim, Z. Ma, **An Introduction to Electrospinning and Nanofibers**, 2005, World Science Publishing, Singapore.
2. M.M. Demir, I. Yilgor, E. Yilgor, B. Erman, “Electrospinning of polyurethane fibers”, **Polymer,** 43, 2002, Pages 3303-3309.
3. A. Frenot, I.S. Chronakis, “Polymer nanofibers assembled by electrospinning”, **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, 8, 2003, Pages 64-75.
4. S.R. Bhattarai, N. Bhattarai, H.K. Yi, P.H. Hwang, D.I. Cha, H.Y. Kim, “Novel biodegradable electrospun membrane: scaffold for tissue engineering”, **Biomaterials**, 25, 2004, Pages 2595-2602.
5. J. Doshi, D.H. Reneker, “Electrospinning process and applications of electrospun fibers”, **Journal of Electrostatic**, 35, 1995, Pages 151-160.
6. H. Fong, I. Chun, D.H. Reneker, “Beaded nanofibers formed during electrospinning”, **Polymer**, 40, 1999, Pages 4585-4592.
7. J. Doshi, D.H. Reneker, “Electrospinning process and applications of electrospun fibers”, **Journal of Electrostatic**, 35, 1995, Pages 151-160.

8. H. Fong, I. Chun, D.H. Reneker, “Beaded nanofibers formed during electrospinning”, **Polymer**, 40, 1999, Pages 4585-4592.

9. J.M. Deitzel, J. Kleinmeyer, K. Harris, N.C. Beck Tan, “The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles”, **Polymer**, 42, 2001, Pages 261-272.

10. มณิศรา พิริยวิรุตม์, นภาศิริ โรจนชีวะ, นริสา เณรศิริ และ พิชญ์ ศุภผล, “การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของโปรตีนสกัดเข้มข้นจากถั่วเหลือง” **เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมชีวการแพทย์แห่งชาติครั้งที่ 5**, 2550, โรงแรมทวินทาวเวอร์ กรุงเทพฯ ในวันที่ 8 กรกฎาคม 2550.

11. M.J. Rosen, **Surfactants and interfacial phenomena**, 1989, 2nd John Wiley & Sons, Inc., Canada.

12. R.V.N. Krishnappa, K. Desai, C. Sung, “Morphological study of electrospun polycarbonates as function of the solvent and processing voltage”, **Journal of Materials Science**, 38, 2003, Pages 2357-2365.

13. K.H. Lee, H.Y. Kim, H.J. Bang, Y.H. Jung, S.G. Lee, “The change of bead morphology formed on electrospun polystyrene fibers”, **Polymer**, 44, 2003, Pages 4029-4034.

14. Z.M. Huang, Y.Z. Zhang, S. Ramakrishna, C.T. Lim, “Electrospinning and mechanical characterization of gelatin nanofibers”, **Polymer**, 45, 200, Pages 5361-5368.

15. M. Hamid, S. Mohsen, S. Abdolreza, K. Mohamad, “Electro-spray of high viscous liquids for producing mono-sized spherical alginate beads”, **Particuology**, 6, 2008, Pages 271- 275.

16. S. Kiatkamjornwong, P. Surunchanajirasakul, P. Tasakorn, “Natural rubber–cassava starch foam by compression moulding” **Plastics, Rubber and Composites**, 30, 2001, Pages 318-327.

17. บำรุง เลิศลอยกุลชัย, “การศึกษาผลของน้ำยางธรรมชาติและสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติของโฟมแป้งมันสำปะหลัง” **วิทยานิพนธ์ (วศ.ม. วิศวกรรมกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์)** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

18. พรทิพย์ ทูลจินดา, “การศึกษาสมบัติของคอมพอสิตโฟมที่มีแป้งมันสำปะหลัง ไคติน อนุพันธ์ไคติน และน้ำยางพาราเป็นส่วนประกอบ” **วิทยานิพนธ์ (วศ.ม. วิศวกรรมกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์)** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

19. E. Ganjian, M. Khorami, A.A. Maghsoudi, “Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete” **Construction and Building Materials**, 23, 2009, Pages 1828-1836.

20. Rubber Research Institute of Malaysia. Kuala Lumpur, 1966. **Planter`s Bulletin: Specification for castor oil for use in the production of Heveacrumb rubbers.**

21. วราภรณ์ ขจรไชยกุล, **ยางธรรมชาติ: การผลิตและการใช้งาน**, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2549.

22. S. Wu, “Chain structure, phase morphology, and toughness relationships in polymers and blends”, **Polymer Engineering and Science**, 30, 1990, Pages 753-761.

สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

“การปรับปรุงวิธีการเตรียมผงยางพาราขนาดเล็กที่ได้จากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต” สัญญาเลขที่ RDG5250029

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial) 1. ในรายงานไม่มีสารบัญ ไม่มีบทที่ ขอให้เพิ่มเติม 2. ขอให้ทบทวนการใช้คำว่า “nano” ถ้ายังไม่ได้ทำการพิสูจน์ว่าเป็น “nano”	ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial) 1. เนื่องจากในรูปแบบการเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ไม่มีสารบัญ และหมายเลขบท จึงไม่ได้เขียนในรายงาน 2. แก้ไขการใช้คำว่า “nano” เป็น “ขนาดเล็ก” ดังหน้าที่ 4
ความเห็นด้านวิชาการ (Technical) 1. หน้า 19 น้ำยางข้นเริ่มต้นที่ใช้คือ 60% ทำให้ข้นขึ้นโดยระเหยน้ำที่ 60^{O}C นั้น น้ำยางไม่เสียสภาพหรือ? ถ้าไม่มี stabilizer สำหรับในตารางที่ 2 ไม่น่าระบุเป็นน้ำยางข้น 60% แล้ว เพราะก่อนเติมสารต่างๆนั้นได้ผ่านการทำให้น้ำยางข้นเป็น 70% แล้ว มีข้อสงสัยว่า การเตรียมสารต่างๆนั้น base on dry weight ของน้ำยาง 100 part หรือไม่ ควรระบุ wet weight ของสารทุกๆตัว รวมทั้งน้ำยางเพิ่มเติมอีก 1 column เพื่อความชัดเจนและตามทั่วไปในการแสดงสูตรกรณีน้ำยาง 2. ข้อสรุปควรระบุความชัดเจนให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 คือ สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองมีเงื่อนไขอย่างไรบ้าง นอกจากความเข้มข้นและปริมาณของน้ำมัน/surfactant 3. นักวิจัยควรทบทวนข้อมูลที่ได้มีการศึกษาและใช้เชิงพาณิชย์มาแล้ว เกี่ยวกับการใช้น้ำมันละหุงผลิตยางครัมป์ (crumb rubber) 4. นักวิจัยควรระบุว่าจะนำไปใช้ประโยชน์อะไร เช่น สารเพิ่มความเหนียวของอะไร มีความคุ้มค่าหรือไม่ ใช้แทนสารอะไร นำมาทำผลิตภัณฑ์อะไร เป็นต้น	ความเห็นด้านวิชาการ (Technical) 1. หน้า 19 น้ำยางข้นเริ่มต้นที่ใช้คือ 60% ทำให้ข้นขึ้นโดยระเหยน้ำที่ 60^{O}C นั้น จากการสังเกตลักษณะของน้ำยางพบว่าไม่มีการเสียสภาพอแต่ย่างใด ถึงแม้ไม่มีการเติม stabilizer สำหรับในตารางที่ 2 แก้ไขเป็นน้ำยางข้น 70% แล้ว ดังหน้าที่ 19 การเตรียมสารต่างๆ ในรายงานฉบับนี้นั้น base on wet weight ของน้ำยาง 100 part อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มเติมอีก 1 column 2. เพิ่ม “โดยควบคุมปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 กิโลโวลต์ และระยะห่างระหว่างปลายเข็มฉีดยาถึงอุปกรณ์รองรับเป็น 35 เซนติเมตร” ซึ่งเป็นสภาวะในการขึ้นรูปด้วยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต ดังหน้าที่ 28 3. เพิ่มข้อมูลการใช้น้ำมันละหุงในการผลิตยางครัมป์ (crumb rubber) ในหัวข้อความสำคัญและความเป็นงานวิจัย ดังหน้าที่ 9 และในหัวข้อ ผลงานที่เกี่ยวข้อง ดังหน้าที่ 18 4. ระบุการนำเอาเม็ดยางที่เตรียมได้จากการปั่นขึ้นรูปด้วยไฟฟ้าสถิตไปใช้ประโยชน์ ดังหน้าที่ 28-29