สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
Abstract	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers)	4
2.2 องค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติ	
2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)	5
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)	6
2.2.3 ลิกนิน (Lignin)	7
2.2.4 สารแทรกหรือองค์ประกอบอื่น ๆ	8
2.3 ปาล์มน้ำมันและชีวมวลจากต้นปาล์มน้ำมัน	8
2.4 การปรับสภาพเพื่อแยกเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose Pretreatment)	
2.4.1 การปรับสภาพทางกายภาพหรือเชิงกล (Physical or Mechanical pretreatment)	10
2.4.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment)	11
2.4.3 การปรับสภาพทางกายภาพเชิงเคมี (Physicochemical pretreatment)	11
2.4.4 การปรับสภาพด้วยวิธีการอื่นๆ	12
2.5 การฟอกและการแยกเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Bleaching and Isolation of nanocellulose)	
2.5.1 การฟอกขาวด้วย H_2O_2	13
2.5.2 การฟอกขาวด้วย NaClO	13
2.5.3 การฟอกขาวด้วย $Na(ClO)_2$	14

หน้า

2.5.4 การฟอกขาวด้วย $Ca(ClO)_2$ 15

2.6 การใช้ประโยชน์จากเส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ 16

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบ 18

3.1.2 สารเคมี 18

3.1.3 วัสดุอุปกรณ์ 18

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 19

3.2.2 การแยกเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากเส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 19

3.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี กายภาพ และสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่แยกได้แต่ละขั้นตอน 20

3.2.4 การเพิ่มปริมาณเส้นใยต้นปาล์มน้ำมันเริ่มต้น 21

บทที่ 4 ผลและการวิจารณ์ผลการวิจัย

4.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 22

4.1.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 22

4.1.3 สัณฐานวิทยาและลักษณะพื้นผิวของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 24

4.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของเส้นใยที่แยกได้ในแต่ละขั้นตอน

4.2.1 เส้นใยหลังจากการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25

4.2.2 เส้นใยเซลลูโลสหลังการฟอกขาว 29

4.2.3 เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้ 34

4.3 การเพิ่มปริมาณการแยกเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากต้นปาล์มน้ำมัน

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสในแต่ละขั้นตอน 46

4.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้ 47

4.3.3 ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้ 47

4.3.4 สัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้ 48

4.3.5 สมบัติเชิงความร้อนของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้ 50

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ 53

เอกสารอ้างอิง 54

ภาคผนวก

ก. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี 58
ข. การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยนาโนเซลลูโลสด้วยเทคนิคต่าง ๆ 62
ค. การเผยแพร่ผลงานวิจัย 64

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ (Mohanty *et al.*, 2005)	4
ตารางที่ 2.2	ลักษณะเฉพาะบางประการของเส้นใยธรรมชาติเปรียบเทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ (Mohanty *et al.*, 2005)	5
ตารางที่ 2.3	ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลปาล์มน้ำมัน (Beijing Forestry and Parks Department of International Cooperation, 2012)	10
ตารางที่ 2.4	สมบัติทางกายภาพของเส้นใยที่ได้จากชีวมวลปาล์มน้ำมันเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง (Mohanty *et al.*, 2005)	10
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมันก่อนการปรับสภาพ	23
ตารางที่ 4.2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอื่นๆ	23
ตารางที่ 4.3	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเส้นใยหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	27
ตารางที่ 4.4	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	29
ตารางที่ 4.5	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเส้นใยหลังการฟอกขาว	31
ตารางที่ 4.6	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหลังการฟอกขาว	33
ตารางที่ 4.7	ค่าความขุ่นของสารแขวนลอยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้	36
ตารางที่ 4.8	ร้อยละความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากเส้นใยต้นปาล์มน้ำมันที่สภาวะต่าง ๆ	38
ตารางที่ 4.9	ตัวแปรเชิงความร้อน (DSC) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความเข้มสูง	42
ตารางที่ 4.10	ตัวแปรเชิงความร้อน (TGA) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความเข้มสูง	44
ตารางที่ 4.11	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนาโนเซลลูโลสเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเริ่มต้น	47

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของเซลลูโลส (Mohanty *et al.*, 2005)	6
รูปที่ 2.2	ลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช (Salmén, 2009)	6
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Saka, 2001)	7
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของลิกนิน (Mohanty *et al.*, 2005)	7
รูปที่ 2.5	ลักษณะลำต้นปาล์มน้ำมันที่ถูกโค่น (Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 2012)	9
รูปที่ 2.6	การสลายตัวของโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ที่ค่า pH ต่างๆ (เกษม, 2537)	14
รูปที่ 2.7	การสลายตัวของโซเดียมคลอไรต์ ที่ค่า pH ต่างๆ (เกษม, 2537)	15
รูปที่ 2.8	เส้นใยธรรมชาติที่มีการนำไปใช้ในวัสดุเสริมแรง (Mohanty *et al.*, 2005)	16
รูปที่ 4.1	เส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน	22
รูปที่ 4.2	พื้นผิวของเส้นใยต้นปาล์มน้ำมันจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1.6 เท่า	24
รูปที่ 4.3	ปฏิกิริยาการแตกพันธะ phenolic β-O-4 structures ของลิกนินในกระบวนการผลิตเยื่อคร๊าฟต์ (Gellerstedt, 2009)	25
รูปที่ 4.4	เส้นใยต้นปาล์มน้ำมันขณะปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ก) กระบวนการอัลตราโซนิคความเข้มสูง (ข) กระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ	26
รูปที่ 4.5	ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยหลังการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในกระบวนการใช้อัลตราโซนิคความเข้มสูง (a) 2 (b) 4 (c) 6 % wt NaOH และกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำ (d) 2 (e) 4 (f) 6 % wt NaOH เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1.6 เท่า	28
รูปที่ 4.6	ลักษณะของเส้นใยในระหว่างการฟอกขาว (a) เส้นใยที่ผ่านการฟอกครั้งแรก (b) เส้นใยที่ผ่านการฟอกซ้ำครั้งที่ 2 (c) เส้นใยที่ผ่านการฟอก 3 ซ้ำ	30
รูปที่ 4.7	ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยหลังการฟอกขาวครั้งแรก ในกระบวนการใช้อัลตราโซนิคความเข้มสูงที่ผ่านการปรับสภาพเส้นใยด้วย (a) 2 (b) 4 (c) 6 % wt NaOH และกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำที่ผ่านการปรับสภาพด้วย (d) 2 (e) 4 (f) 6 % wt NaOH เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 1.6 เท่า	32
รูปที่ 4.8	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากต้นปาล์มน้ำมันหลังการปรับสภาพ (คอลัมน์ซ้าย) และหลังการฟอกขาว (คอลัมน์ขวา)	34

หน้า

รูปที่ 4.9 เส้นใยนาโนเซลลูโลสแขวนลอยในน้ำกลั่นที่แยกได้จากเส้นใยต้นปาล์มน้ำมันที่ปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH โดยการใช้อัลตราโซนิคความเข้มสูง กำลัง (a) 800 (b) 1000 (c) 1200 วัตต์ และการระเบิดด้วยไอน้ำในกรดออกซาลิกเข้มข้น (d) 5 และ (e) 11 % wt 35

รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตราของ (a) เส้นใยปาล์มน้ำมัน เปรียบเทียบกับเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH แล้วผ่านการแยกด้วยกระบวนการใช้อัลตราโซนิคความเข้มสูงโดยใช้กำลัง (b) 800 และ (c) 1000 (d) 1200 วัตต์ (e) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วย 4 % wt NaOH น้ำหนัก ร่วมกับอัลตราโซนิคความเข้มสูง กำลัง 1000 วัตต์ และ (f) เส้นใยที่ปรับสภาพด้วย 6 % wt NaOH ร่วมกับอัลตราโซนิคความเข้มสูง กำลัง 1000 วัตต์ 37

รูปที่ 4.11 ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (a) เส้นใยปาล์มน้ำมัน เปรียบเทียบกับเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากต้นปาล์มน้ำมันหลังการปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH ร่วมกับอัลตราโซนิค กำลัง (b) 800 (c) 1000 (d) 1200 วัตต์ และ (e) เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากต้นปาล์มน้ำมันหลังการปรับสภาพด้วยสารละลาย 4 % wt NaOH ร่วมกับการใช้อัลตราโซนิค กำลัง 1000 วัตต์ 39

รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ที่แยกได้จากจากต้นปาล์มน้ำมัน เมื่อระเบิดด้วยไอน้ำร่วมกับ 5 % wt Oxalic acid โดยผ่านการปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH เปรียบเทียบกับเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคกำลัง 1000 วัตต์ ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย (b) 2 และ (c) 4 % wt NaOH (กำลังขยาย 50,000 เท่า) 40

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากต้นปาล์มน้ำมัน เมื่อ (a) ระเบิดด้วยไอน้ำร่วมกับ 5 % wt Oxalic acid โดยผ่านการปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH และจากกระบวนการใช้คลื่นอัลตราโซนิค กำลัง 1000 วัตต์ ที่ได้จากการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกโซด์เข้มข้น (b) 2 และ (c) 4 % wt NaOH 41

รูปที่ 4.14 กราฟเชิงความร้อนจากการวิเคราะห์ DSC ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความเข้มสูงที่กำลัง (a) 800 (b) 1000 และ (c) 1200 วัตต์ 41

รูปที่ 4.15 กราฟความร้อนโน้มถ่วง (TG) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความเข้มสูงที่กำลัง (a) 800 (b) 1000 และ (c) 1200 วัตต์ เปรียบเทียบกับ (d) เส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 43

รูปที่ 4.16 กราฟอนุพันธ์ความร้อนโน้มถ่วง (DTG) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความเข้มสูงที่กำลัง (a) 800 (b) 1000 และ (c) 1200 วัตต์ เปรียบเทียบกับ (d) เส้นใยต้นปาล์มน้ำมัน 43

หน้า

รูปที่ 4.17 ลักษณะของเส้นใย (a) ขณะฟอกขาวครั้งแรกด้วย 3 % wt $Ca(OCl)_2$ (b) เส้นใยหลังการฟอกขาวครั้งแรก (c) หลังการฟอกขาวครั้งที่ 2 (d) เส้นใยที่ผ่านการฟอก 3 ซ้ำ 46

รูปที่ 4.18 เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำในกรดออกซาลิคความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 47

รูปที่ 4.19 ความเป็นผลึกของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (a) แยกได้จากต้นปาล์มน้ำมันด้วยวิธีการระเบิดด้วยไอน้ำเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเริ่มต้น 500 กรัม เปรียบเทียบกับ (b) เส้นใยดิบจากต้นปาล์มน้ำมัน และ (c) นาโนเซลลูโลสจากการใช้อัลตราโซนิค กำลัง 1000 วัตต์ เมื่อใช้เส้นใยเริ่มต้น 10 กรัม 48

รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของผงเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แยกได้จากต้นปาล์มน้ำมันเริ่มต้น 500-1000 กรัม เมื่อระเบิดด้วยไอน้ำร่วมกับ 5 % wt oxalic acid โดยผ่านการปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH (a) ผิวหน้าของแผ่นเส้นใยนาโนเซลลูโลส (กำลังขยาย 3,000 เท่า)และ (b) ภาคตัดขวางของแผ่นเค้กเส้นใยนาโนเซลลูโลส (กำลังขยาย 10,000 เท่า) 49

รูปที่ 4.21 สัณฐานวิทยาของผงเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่แยกได้จากต้นปาล์มน้ำมันเริ่มต้น 500-1000 กรัม เมื่อระเบิดด้วยไอน้ำร่วมกับ 5 % wt oxalic acid โดยผ่านการปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH (กำลังขยาย 80,000 เท่า) 50

รูปที่ 4.22 กราฟความร้อนโน้มถ่วงและอนุพันธุ์ความร้อนโน้มถ่วง (TG-DTG) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยต้นปาล์มน้ำมันเป็น 500-1000 กรัม 50

รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์ความร้อนโน้มถ่วง (TGA) ของเส้นใยนาโนเซลลูโลส (a) ที่แยกได้เมื่อใช้สารตั้งต้น 500-1000 กรัม ปรับสภาพด้วย 2 % wt NaOH ตามด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ เปรียบเทียบกับ (b) เส้นใยต้นปาล์มน้ำมันก่อนการปรับสภาพและ (c) เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่แยกได้เมื่อใช้สารตั้งต้น 10 กรัม ปรับสภาพด้วย 4 % wt NaOH ตามด้วยการใช้คลื่นอัลตราโซนิคกำลัง 1000 วัตต์ 51