สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญ	ฉ
สารบาญตาราง	ฌ
สารบาญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 แนวคิดในการวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	5
1.4 แผนการดำเนินการ ขอบเขต และวิธีการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎี/ หรือเชิงประยุกต์	6
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 สมบัติของยางธรรมชาติและปฏิกิริยาการคงรูป	
2.1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ	7
2.1.2 สารเคมียาง	11
2.1.3 ปฏิกิริยาการคงรูป	13
2.2 สมบัติของซิงค์ออกไซด์/ ซิงค์ออกไซด์เตตราพอต	15
2.3 พอลิอิเล็กโทรไลต์	18
2.4 สารลดแรงตึงผิว	19
2.5 สารคู่ควบไซเลน	21
2.6 วัสดุผสม	22

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุผสมยางธรรมชาติ	
2.7.1 ความทนแรงดึง (tensile strength)	26
2.7.2 การทดสอบค่าความแข็ง (hardness Test)	30
2.7.3 การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน	37
2.7.4 การวิเคราะห์ศักย์ซีตา	39
2.7.5 การวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	40
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย	
3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคซิงค์ออกไซด์	44
3.2 กระบวนการเตรียมวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	46
3.3 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุผสมของยางธรรมชาติ	
3.3.1 การทดสอบการทนแรงดึง (Tensile strength)	49
3.3.2 การทดสอบความแข็ง (hardness)	50
3.4 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน	51
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย	
4.1 การตรวจสอบกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคซิงค์ออกไซด์	52
4.2 ศึกษาลักษณะของวัสดุผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	57
4.3 สมบัติเชิงกลวัสดุผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	
4.3.1 การทดสอบการทนแรงดึง (Tensile strength)	61

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การทดสอบความแข็ง (hardness)	67
4.4 สมบัติทางความร้อนวัสดุผสมยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	70
4.5 วิจารณ์ผลการวิจัย	72
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	
5.1.1 การตรวจสอบกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคซิงค์ออกไซด์	74
5.1.2 ศึกษาลักษณะวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	75
5.1.3 สมบัติทางกลวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	75
5.1.4 สมบัติทางความร้อนวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก	79
ประวัติผู้เขียน	82

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ	10
2.2 สมบัติทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์เตตราพอด Tetrapod shaped ZnO Whisker : T-ZnO	17
2.3 ลักษณะของกราฟความเค้น-ความเครียดที่เกี่ยวของกับสมบัติของพลาสติก	28
2.4 ค่าความทนต่อแรงดึง ณ จุดขาดสำหรับพอลิเมอร์ทั่วไป	29
2.5 ค่าความแข็งของวัสดุพลาสติกต่างๆ	30
2.6 แสดงคุณสมบัติเครื่องวัดความแข็งชนิด A	36
3.1 ส่วนผสมของน้ำยางพาราหล่อแบบ	47
4.1 ตารางสรุปสมบัติทางกลวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	70
4.2 ตารางวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักในแต่ละช่วงอุณหภูมิ	70
5.1 ตารางสรุปสมบัติทางกลวัสดุผสมของยางธรรมชาติกับอนุภาคซิงค์ออกไซด์	75

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 ก. สูตรโครงสร้างของ isoprene และ ข. สูตรโครงสร้างของ polyisoprene	8
2.2 สูตรโครงสร้างของกรดสเตียริก (C18H36O2)	12
2.3 สูตรโครงสร้างของ N-cyclohexyl-2-benzothiazyl-sulfenamide (CBS)	13
2.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน	14
2.5 ปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization reaction)	15
2.6 แสดงลักษณะของซิงค์ออกไซด์เตตราพอด (Tetrapod shaped ZnO Whisker : T-ZnO) จากห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	17
2.7 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ Sodium trisilicate solution, Water glass	18
2.8 แสดงโครงสร้างโมเลกุลและลักษณะการกระจายตัวของ Surface Active Agent	19
2.9 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสารคู่ควบไซเลน Si-69	21
2.10 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวสัมผัสสองผิวที่หยาบ	24
2.11 การแพร่กระจายระหว่างโมเลกุล	24
2.12 แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต	24
2.13 พันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัส	25
2.14 การยึดติดเชิงกล	25
2.15 แผนภาพแสดงความเค้น-ความเครียด (Stress-strain)	26
2.16 ประเภทของกราฟความเค้น-ความเครียด	28
2.17 หลักการหาความแข็งแบบบริเนล	31
2.18 การหาความแข็งแบบร็อคเวลล์	32

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.19 การหาแบบแบบวิกเกอร์	34
2.20 ลักษณะหัวกดและรอยกดความแข็งแบบนูป	34
2.21 แสดงคุณลักษณะหัวกดเครื่องวัดความแข็งของยางชนิด A	36
2.22 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย TGA	38
2.23 เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์ polymer ด้วย TGA	38
2.24 แสดงลักษณะประจุที่ผิวของอนุภาค และบริเวณศักย์ซีตา	39
2.25 แสดงการสั่นของพันธะเมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	41
3.1 Zeta Potential Analyzer รุ่น Malvern Zetasizer Nano-ZS	45
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (EDS)	46
3.3 ขนาดและลักษณะของโมลหล่อชิ้นงานทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D412-98 Die-C	48
3.4 ขนาดและลักษณะของชิ้นทดสอบ	49
3.5 เครื่องทดสอบ tensile test รุ่น H10KS บริษัท Hounsfield test equipment ประเทศอังกฤษ	50
3.6 Shore type “A” Durometer รุ่น HT-6510A	51
4.1 การตรวจสอบการกระจายตัวในน้ำ (pH~10) ของอนุภาคซิงค์-ออกไซด์ที่ทรีทเมนต์ด้วยสาร Sodium Silicate Solution (SSS) 0 wt%, 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt% และ 25 wt% ตามลำดับจากซ้ายไปขวา เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง	52
4.2 กราฟ Zeta potential (ζ) ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วย SSS และ CTAB	53
4.3 กราฟ FT-IR spectra ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านการทรีทเมนต์ด้วย SSS	55

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.4 กราฟ FT-IR spectra ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ผ่านผ่านการทรีทเมนต์ด้วย CTAB	55
4.5 ภาพ FE-SEM 50,000X ของ ก) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ปกติ ข) อนุภาคซิงค์ออกไซด์ ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพด้วย SSS	56
4.6 ภาพถ่าย SEI-SEM, top views วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ก) ZnO nanopowder ข) Tetrapod shaped ZnO Whisker	57
4.7 ภาพถ่าย BEI-SEM, top views วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ก) ZnO nanopowder ข) Tetrapod shaped ZnO Whisker	58
4.8 ภาพถ่าย cross section วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder ก) ถ่ายด้วย OM ข) ถ่ายด้วย BEI-SEM	59
4.9 ภาพถ่าย cross section วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker ก) ถ่ายด้วย OM ข) ถ่ายด้วย BEI-SEM	59
4.10 ภาพ SEI-SEM วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker	60
4.11 กราฟ stress-strain วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder ก่อนการทรีทเมนต์ด้วย functional reagent	61
4.12 กราฟ stress-strain วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker ก่อนการทรีทเมนต์ด้วย functional reagent	62
4.13 กราฟ stress-strain วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt%	62

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.14 กราฟ stress-strain วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย CTAB 0.5 wt%, 1.0 wt%, 1.5 wt% และ 2.0 wt%	63
4.15 กราฟ stress-strain วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt% เทียบกับ CTAB 1.0 wt%	64
4.16 กราฟ stress-strain วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt% เทียบกับ CTAB 1.0 wt%	65
4.17 กราฟ tensile strength at yield วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt% เทียบกับ CTAB 1.0 wt%	66
4.18 กราฟ tensile strength at yield วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt% เทียบกับ CTAB 1.0 wt%	67
4.19 กราฟความสัมพันธ์ของค่า hardness วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt%	67
4.20 กราฟความสัมพันธ์ของค่า hardness วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย CTAB 0.5 wt%, 1.0 wt%, 1.5 wt% และ 2.0 wt%	68
4.21 กราฟความสัมพันธ์ของค่า hardness วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ ZnO nanopowder หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt% เทียบกับ CTAB 1.0 wt%	68
4.22 กราฟความสัมพันธ์ของค่า hardness วัสดุผสมยางธรรมชาติกับ Tetrapod shaped ZnO Whisker หลังการทรีทเมนต์ด้วย SSS 10 wt% เทียบกับ CTAB 1.0 wt%	69

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.23 การวิเคราะห์ Thermogravimetric Analysis (TGA)	71
4.24 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)	72
4.25 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ Sodium trisilicate solution (SSS)	73
4.26 แสดงรูปแบบการยึดติดของสายโซ่โมเลกุลบนผิวอนุภาค Tail, Loop และ Train	73

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved