สารบัญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ง
บทคัดย่อภาษาไทย		จ
ABSTRACT		ฉ
สารบัญตาราง		ฎ
รายการอักษรย่อ/สัญลักษณ์/อภิธานศัพท์		ณ
บทที่ 1	บทนำ	1
1.1	บทนำ	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
บทที่ 2	วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1	คำจำกัดความและความหมาย	4
2.2	วัสดุเซรามิกชีวภาพ (Ceramic biomaterials)	4
2.3	วัตถุประสงค์ของการใช้วัสดุการแพทย์	6
2.4	คุณสมบัติของวัสดุเซรามิก	7
2.4.1	การเสื่อมสภาพของวัสดุเซรามิก	7
2.4.2	วัสดุเซรามิกที่นำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์	8
2.4.3	ประเภทของวัสดุเซรามิกที่ใช้ในการผ่าตัดซ่อมแซมกระดูก	9
2.5	คุณสมบัติของวัสดุทดแทนกระดูก	10
2.6	วัสดุชีวภาพการแพทย์ออร์โธปิดิกส์	19
2.7	กระดูก (bone)	22
2.7.1	กระดูกของคนแบ่งออกเป็น	22
2.7.2	สมบัติเชิงกลของกระดูก	25
2.7.3	กระดูกเทียม (Bone substitute materials)	27
2.7.4	วัสดุทดแทนกระดูก (Bone graft)	28

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.8 แคลเซียมฟอสเฟต (Calcium Phosphate) 30
2.9 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต 32
2.10 แบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต 34
2.11 เฟร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectric) 36
2.11.1 อุณหภูมิคูรี และการเปลี่ยนเฟส (Curie temperature and phase transition) 37
2.11.2 โพลาไรเซชัน (Polarization) 37
2.11.3 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) 38
2.11.4 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity; ε_r) 38
2.11.5 ค่าความสูญเสียไดอิเล็กทริก (Dielectric Loss; tanδ) 41
2.12 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง 41

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง 44
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 44
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 45
3.3 วิธีการทดลอง 46
3.3.1 การสกัดเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ 46
3.3.2 การตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffraction 50
3.3.3 การหาความหนาแน่นของอนุภาค 51
3.4 ขั้นตอนการเตรียมแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนตแบบสารละลายของแข็ง 52
3.4.1 ขั้นตอนการเติมแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนตลงในเบตาไตรแคลฟอสเฟตด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 53
3.4.2 ขั้นตอนการเตรียมเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เติมแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต 54
3.5 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของเซรามิก 56
3.5.1 การหาค่าความหนาแน่น 56
3.5.2 การหาค่าการหดตัวหลังการเผา 57
3.6 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) 57
3.7 การตรวจสอบสมบัติทางกลของเซรามิก 60
3.7.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์(Vickers hardness) 60

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.8 การตวจสอบสมบัตทางไฟฟ้า 62
3.8.1 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริก (dielectric properties) ที่อุณหภูมิห้อง 62
3.8.2 การตรวจสอบสมบัติไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์กับอุณหภูมิ (dielectric constant VS temperature) 63
3.8.3 การตรวจสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric measurement) 64
3.8.4 การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coefficient, d_{33}) 64
3.9 การทดสอบทางชีวภาพ 65
3.9.1 การทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (vitro bioreastivity tastes) 65

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 67
4.1 การตรวจสอบผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่สกัดมาจากเปลือกไข่ 67
4.1.1 ผลการตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ 68
4.1.2 ผลการหาความหนาแน่นของอนุภาคเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต 68
4.2 ผลการตรวจสอบเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เติมBZT 69
4.2.1 ผลการตรวจสอบความหนาแน่น 69
4.2.2 ผลการตรวจสอบเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซเรย์ 71
4.2.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 72
4.2.4 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness)และการทดสอบความแข็งแบบนูบ(Knoop Hardness) 77
4.2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เติม BZT 79
4.2.6 การทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพ 91

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 96
5.1 สรุปผลการทดลอง 96
5.2 ข้อเสนอแนะ 98

เอกสารอ้างอิง 99
ภาคผนวก 107

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่2.1 คำแนะนำในการพิจารณาวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ 13
ตารางที่2.2 หัวข้อการพิจารณาความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุ 14
ตารางที่2.3 เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ 15
ตารางที่2.4 การจักกลุ่มของปฏิกิริยาของเซลล์ 15
ตารางที่2.5 สรุปความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย SBF ชนิดต่างๆเทียบกับพลาสมาของเลือด 17
ตารางที่2.6 แสดงคุณสมบัติและการใช้งานของวัสดุทางการแพทย์ 21
ตารางที่2.7 แสดงสมบัติเชิงกลของ Compact bone ของมนุษย์ 27
ตารางที่2.8 แสดงกระดูกเทียมสังเคราะห์ในกลุ่ม TCP 33
ตารางที่2.9 แสดงขนาดต่างๆของกระดูกเทียม TCP 34

ตารางที่3.1 สารเคมีและวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง 44
ตารางที่3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 45
ตารางที่3.3 แสดงตารางการคำนวณสารตามอัตราการเติม BZT ที่อัตราส่วนต่างๆ 53
ตารางที่3.4 แสดงปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย SBF เทียบกับความเข้มข้นของเลือด 66

ตารางที่4.1 แสดงผลการหาค่าความหนาแน่นอนุถาคของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต 69
ตารางที่4.2 แสดงอัตราส่วน Ca:Pของเซรามิกβ-TCP/BZTเมื่อมีปริมาณของ BZT เพิ่มขึ้น 76
ตารางที่4.3 แสดงอัตราส่วน Ca:P ก่อนการโพล และหลังการโพลSBF 94

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	เฟสไดอะแกรมของแคลเซียมและฟอสฟอรัส($CaO–P_2O_5$)	2
ภาพที่ 2.1	แผนภูมิแสดงลักษณะของความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุ	12
ภาพที่ 2.2	แสดงแบบแผนของการเปลี่ยนแปลงบนผิวหน้าของไฮดรอกซีอะพาไทต์ในสารละลาย SBF	19
ภาพที่ 2.3	แสดงถึงกระดูกแกนในร่างกาย	23
ภาพที่ 2.4	แสดงถึงกระดูกรยางค์ในร่างกาย	24
ภาพที่ 2.5	แสดง (a) ระดับการเชื่อมต่อ (Hierarchical level) ของโครงสร้างกระดูกมนุษย์ (b)กายวิภาคของกระดูกยาว	24
ภาพที่ 2.6	แสดง (a) ภาพของภาคตัดขวางที่แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของกระดูกหน้าแข็งมนุษย์,(b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกระดูกโปร่ง	25
ภาพที่ 2.7	แสดงกราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของกระดูก	26
ภาพที่ 2.8	แสดงโครงสร้างทางเคมีของไตรแคลเซียมฟอสเฟต	32
ภาพที่ 2.9	โครงสร้างของสาร $BaTiO_3$	35
ภาพที่ 2.10	การเปลี่ยนแปลงยูนิตเซลล์ของผลึกเดี่ยว $BaTiO_3$	35
ภาพที่ 2.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า (E) กับโพลาไรเซชัน (P) ของสารเฟร์โรอิเล็กทริก	37
ภาพที่ 2.12	แสดงการจัดเรียงไดโพลภายในเนื้อสารก่อน และภายหลังการให้สนามไฟฟ้า	38
ภาพที่ 2.13	ตัวเก็บประจุของแผ่นคู่ขนานเมื่อไม่มีสารไดอิเล็กทริก	39
ภาพที่ 3.1	เปลือกไข่ที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้ว	47
ภาพที่ 3.2	เครื่องบดผสมแบบหมุนวน	47
ภาพที่ 3.3	แสดงแผนภาพขั้นตอนการสังเคราะห์เบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่	48
ภาพที่ 3.4	แสดงแผนภาพขั้นตอนการเผาแคลไซน์เปลือกไข่	49
ภาพที่ 3.5	แสดงแผนภาพขั้นตอนการเผาแคลไซน์เบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	49

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพที่ 3.6	เครื่องMiniflux II	50
ภาพที่ 3.7	ขวดพิกโนมิเตอร์	52
ภาพที่ 3.8	แสดงตู้อบสาร	52
ภาพที่ 3.9	แสดงแผนภาพขั้นตอนการเผาแคลไซน์แบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต	53
ภาพที่ 3.10	แสดงขั้นตอนการเติมแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต	54
ภาพที่ 3.11	แสดงแผนภาพขั้นตอนการเตรียมเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เติมแบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต	55
ภาพที่ 3.12	ชุดอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1เซนติเมตร	56
ภาพที่ 3.13	เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	57
ภาพที่ 3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	58
ภาพที่ 3.15	แสดงแผนภาพขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค	59
ภาพที่ 3.16	หลักการทำงานของกทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ตามมาตรฐาน ASTM	61
ภาพที่ 3.17	ลักษณะรอยหัวกดแบบต่างๆจากการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (a) รอยกดแบบสมบูรณ์ (ideal indentation) (b) รอยกดลักษณะบุ๋มลงไป (sink-in indentation) (c) รอยกดลักษณะซ้อนๆกันขึ้นไป (pile-upindentation) (d) รอยกดสี่เหลี่ยมรูปว่าว (kite-shaped indentation)	61
ภาพที่ 3.18	เครื่องวัดค่าความความแข็งแบบวิสเกอร์ (Vickers Hardness Tester)	61
ภาพที่ 3.19	19แสดงเครื่อง E4980A 20 Hz – 2 MHz Precision LCR meter	63
ภาพที่ 3.20	แสดงชุดควบคุมและประมวลผลเพื่อทดสอบสมบัติไดอิเล็กทริกเทียบกับอุณหภูมิ	63
ภาพที่ 3.21	แสดงชุดทดสอบสมบัติเฟร์โรอิเล็กทริก	64
ภาพที่ 3.22	แสดงเครื่องมือในการโพลสารเซรามิก	65
ภาพที่ 3.23	แสดงเครื่อง KCF S5865 d_{33}meter	65
ภาพที่ 3.24	แสดงการแช่เม็ดเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตในสารละลาย SBF	66
ภาพที่ 4.1	แสดงลักษณะผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์จากเปลือกไข่	67
ภาพที่ 4.2	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของผงเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	68
ภาพที่ 4.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเทียบกับปริมาณการเติมBZT ที่เติมลงในเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	70
ภาพที่ 4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวเชิงเส้นเทียบกับปริมาณการเติม BZT ที่ปริมาณต่างๆของเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต	71

ภาพที่ 4.5	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250^{O}C	75
ภาพที่ 4.6	แสดงรูปโครงสร้างทางจุลภาคพื้นผิวที่กำลังขยาย 1000X(a-e) และลักษณะการแตกของเซรามิกBZT (f-j) a., f. β-TCP/0 BZTVol%, b., g.β-TCP/20BZTVol%, c., h. β-TCP/40BZTVol%,d., i. β-TCP/60BZTVol% และ d., j. β-TCP/80BZTVol%	74
ภาพที่ 4.7	แสดงรูปโครงสร้างทางจุลภาคพื้นผิวที่ทำการตรวจสอบด้วย EDS a) β-TCP/0 BZTVol%, b) β-TCP/20BZTVol%, c) β-TCP/40BZTVol%, d) β-TCP/60BZTVol%, e) β-TCP/80BZTVol%,	75
ภาพที่ 4.8	แสดงถึงปริมาณของอัตราส่วน Ca:P	76
ภาพที่ 4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบวิกเกอร์กับปริมาณการเติม BZT	77
ภาพที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบนูปกับปริมาณการเติม BZT	78
ภาพที่ 4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อการแตกหักกับปริมาณการเติมBZT	78
ภาพที่ 4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณการเติมBZT ที่อุณหภูมิห้อง	80
ภาพที่ 4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับปริมาณการเติม BZT ที่อุณหภูมิห้อง	80
ภาพที่ 4.14	แสดงถึงค่าไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของ β-TCP/BZT ที่ 0 Vol% ที่ความถี่ 1kHz, 10kHz, 100kHz, 500kHzและ 1 MHz	81
ภาพที่ 4.15	แสดงถึงค่าไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของ TCP/BZT ที่ 20 Vol% ที่ความถี่ 1kHz, 10kHz, 100kHz, 500kHzและ 1 MHz	82
ภาพที่ 4.16	แสดงถึงค่าไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของβ-TCP/BZT ที่ 40 Vol% ที่ความถี่ 1kHz, 10kHz, 100kHz, 500kHzและ 1 MHz	82
ภาพที่ 4.17	แสดงถึงค่าไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของ β-TCP/BZT ที่ 60 Vol% ที่ความถี่ 1kHz, 10kHz, 100kHz, 500kHzและ 1 MHz	83
ภาพที่ 4.18	แสดงถึงค่าไดอิเล็กทริกและแฟกเตอร์การสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิของ β-TCP/BZT ที่ 80 Vol% ที่ความถี่ 1kHz, 10kHz, 100kHz, 500kHzและ 1 MHz	83
ภาพที่ 4.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 KHz	84
ภาพที่ 4.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริกกับอุณหภูมิที่ความถี่ 1 KHz	84
ภาพที่ 4.21	แสดงถึงลักษณะโมเดลแบบพาราเรล(a),โมเดลซีรี่ย์(b),โมเดลคิวบ์(c)	86
ภาพที่ 4.22	แสดงถึงรูปแบบโมเดลฟุรุคาวา(Furukawa model)	86

ภาพที่ 4.23 แสดงถึงโมเดลไดอิเล็กทริกทั้งสามโมเดลของวัสดุผสมβ-TCP/BZT 87
ภาพที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของค่าเฟอร์โรอิเล็กทริกตามปริมาณการเติม BZT ที่ร้อยละ โดยปริมาตรที่ 0, 20, 40,60และ 80 ของ BZT 88
ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพียโซอิเล็กทริกตามปริมาณการเติมBZT ที่ร้อยละ โดยปริมาตรที่ 0, 20, 40,60และ 80 ของ BZT 89
ภาพที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์โมเดลของค่าเพียโซอิเล็กทริก(Piezoelelctric)ตามปริมาณ การเติมBZT ที่ร้อยละโดยปริมาตรที่ 0, 20, 40, 60และ 80 ของ BZT 90
ภาพที่ 4.27 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของพื้นผิวเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต ไม่ได้ทำการโพลที่กำลังขยาย 1,500X ที่ระยะเวลาการแช่ 14 วัน 92
ภาพที่ 4.28 แสดงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของพื้นผิวเซรามิกเบตาไตรแคลเซียมฟอสเฟต กำลังขยาย 10,000X 93
ภาพที่ 4.29 แสดงอัตราส่วน Ca:Pของ β-TCP/BZT 94
ภาพที่ 4.30 แสดงค่าความแข็งหลังแช่ SBF และ ก่อนแช่ SBF 95

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการอักษรย่อ

ACP	Nano-crystalline calcium phosphate
BCP	ไบฟาสิคแคลเซียมฟอสเฟต
BZT	แบเรียมเซอร์โคเนียมไททาเนต
Ca	แคลเซียม
c-SBF	corrected- SBF
DNA	Deoxyribonucleic acid
EDS	Energy Dispersive Spectroscope
P	ฟอตฟอรัส
HA	ไฮดรอกซีอะพาไทต์
HV	ค่าความแข็งแบบวิสเกอร์
n-SBF	newly improved SBF
r-SBF	Reviesd SBF
SBF	Simulated body fluid
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
sec.	วินาที
TCP	ไตรแคลเซียมฟอสเฟต
β-TCP	เบตาไตรแคลเซียมฟอตเฟส
Temp.	Temperature
TEM	Transmission electron microscopy
XRD	X-ray Diffractrometer

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รายการสัญลักษณ์

Al_2O_3	อะลูมินา
Ba^{2+}	แบเรียมไอออน
B_2O_3	โบรอนออกไซด์
$BaTiO_3$	แบเรียมไททาเนต
$BaZrO_3$	แบเรียมเซอร์โคเนต
CaO	แคลเซียมออกไซด์
$Ca(OH)_2$	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
$CaCO_3$	แคลเซียมคาร์บอเนต
$Ca3(PO_4)_2$	ไตรแคลเซียมฟอสเฟส
$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$	ไฮดรอกซีอะพาไทต์
Ca5P3O12	อะพาไทต์
$CaO{\cdot}nAl_2O_3$	อะลูมิเนท
Ca^{2+}	แคลเซียมไอออน
Cl^-	คลอไรด์ไอออน
CO_3^{2-}	คาร์บอเนตไอออน
$CoFe_2O_4$	Cobalt ferrite
F^-	ฟลูออไรด์ไอออน
PO_4^{3-}	ฟอตเฟสไอออน
h	ความลึกของรอยกด
HPO_4^{2-}	ไดไฮโดรเจนฟอตเฟตไอออน
$H2PO_4^{2-}$	ไฮโดรเจนฟอตเฟตไอออน
HCO^{3-}	ไบคาร์บอเนตไอออน
K^+	โพแทสเซียมไอออน
KIC	ความทนทานต่อการแตกหัก
l	เส้นผ่านศูนย์กลางหลังการเผาผนึก
Mg^{2+}	แมกนีเซียมไอออน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$Mg_3Si_3O_{10}COH$	ผงแป้ง
OH^-	ไฮดรอกไซด์ไอออน
P	แรงที่ใช้ในการทดสอบ
PO_4^{3-}	ฟอตเฟตไอออน
R_H	Radius
SO_4^{2-}	ซัลเฟตไอออน
Sr^{2+}	สตรอนเซียมไอออน
SiO_2	ควอทซ์
ZrO_2	เซอร์โคเนีย
η	solvent viscosity
ρ	ความถ่วงจำเพาะ
ρ_{st}	ความหนาแน่นของของเหลว
ε_r	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
$\tan\delta$	ค่าการสูญเสียไดอิเล็กทริก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved