คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมโดยผสมโพลีคาร์บอกซีเลต
ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง

นาย นรชัย วงศ์กรเชาวลิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาเอ็นโดดอนต์ ภาควิชาทันตกรรมหัตถการ
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE PHYSICAL PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT WITHOUT GYPSUM MIXED WITH POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZER FOR USING AS A DIRECT PULP CAPPING MATERIAL

Mr. Norachai Wongkornchaowalit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Endodontology
Department of Operative Dentistry
Faculty of Dentistry
Chulalongkorn University
Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมโดยผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง
โดย	นายนรชัย วงศ์กรเชาวลิต
สาขาวิชา	วิทยาเอ็นโดดอนต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. วีระ เลิศจิรากร

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง วัชราภรณ์ ทัศจันทร์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร. ศิริวิมล ศรีสวัสดิ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. วีระ เลิศจิรากร)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ดร. ชุติมา ระติสุนทร)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สุรสิทธิ์ เกียรติพงษ์สาร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นรชัย วงศ์กรเชาวลิต : คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมโดยผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง. (THE PHYSICAL PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT WITHOUT GYPSUM MIXED WITH POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZER FOR USING AS A DIRECT PULP CAPPING MATERIAL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ทพ.ดร.วีระ เลิศจิรากาาร, 141 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์-พลาสติไซเซอร์ ต่อเวลาการแข็งตัวและคุณสมบัติการไหลแผ่ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม รวมถึงทำการศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพในแง่ของเวลาการแข็งตัว ความทนแรงอัด อุณหภูมิและ ค่าความเป็นกรด-ด่างขณะวัสดุแข็งตัว การปนเปื้อนของโลหะหนัก การกระจายของขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดังกล่าว กับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และโปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่น ทำการวิเคราะห์ผลความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (p<0.05) ผลการศึกษาพบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีเวลาการแข็งตัว 7.03 ± 0.44 นาที ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.001) แต่มีความทนแรงอัดในวันที่ 21 และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคไม่แตกต่างจากเอ็มทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีค่าพีเอช(10.96) ต่ำกว่าเอ็มทีเอ(12.00) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ในนาทีที่ 60 ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะวัสดุแข็งตัวเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 1 องศาเซลเซียส)ในทุกกลุ่มการทดลอง ทั้งนี้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีองค์ประกอบทางเคมีหลักและปริมาณโลหะหนักในวัสดุใกล้เคียงกับเอ็มทีเอ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมเมื่อผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์จะเป็นวัสดุที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นสารปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงได้

ภาควิชา........ทันตกรรมหัตถการ............ลายมือชื่อนิสิต......นรชัย วงศ์กรเชาวลิต..........
สาขาวิชา.......วิทยาเอ็นโดดอนต์............ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์...วีระ เลิศจิรการ...........
ปีการศึกษา....2553..............................

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5276146132 : MAJOR ENDODONTOLOGY

KEYWORDS : ACCELERATED PORTLAND CEMENT / PORTLAND CEMENT WITHOUT GYPSUM / POYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZER / PHYSICAL PROPERTY / MINERAL TRIOXIDE AGGREGATE

NORACHAI WONGKORNCHAOWALIT : THE PHYSICAL PROPERTIES OF PORTLAND CEMENT WITHOUT GYPSUM MIXED WITH POLYCARBOXYLATE SUPERPLASTICIZER FOR USING AS A DIRECT PULP CAPPING MATERIAL. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VEERA LERTCHIRAKARN Ph.D., 141 pp.

The purposes of this study were to investigate the effect of polycarboxylate superplasticizer on setting time and flow characteristic of white Portland cement without gypsum (AWPC), as well as, to compare the chemical compositions and physical properties of AWPC with ordinary white Portland cement (OWPC) and ProRoot MTA mixed with distilled water, in terms of net setting time, compressive strength, temperature and pH during setting, heavy metals contamination, particle size distribution and chemical compositions. The data were statistically analyzed at 0.05 level of confidence. The results showed that the setting time of AWPC were in the range of 7.03 ± 0.44 minutes which was significantly ($p<0.001$) lower than MTA and OWPC groups. The compressive strength of AWPC at 21 days and particle size distribution were not different from MTA. The pH value of AWPC (10.96) was significant lower than MTA (12.00) at 60 minutes ($p<0.05$). Temperature change during setting of all groups were less than 1 degree Celsius. The major chemical compositions and the amounts of heavy metal of AWPC were similar to MTA. The results indicate that AWPC is a potential material which can be developed as a direct pulp capping material.

Department : Operative Dentistry Student's Signature ....

Field of Study : Endodontology Advisor's Signature ....

Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันและผู้มีส่วนร่วมให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ดังรายนามต่อไปนี้

รศ.ทพ.ดร.วีระ เลิศจิราการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางปรับปรุงแก้ไขวิทยาพนธ์

อาจารย์สาขาวิชาวิทยาเอ็นโดดอนต์ ภาควิชาทันตกรรมหัตถการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ ความใฝ่รู้ ตลอดจนจริยธรรมให้แก่ข้าพเจ้า

ทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองในวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา (Chulalongkorn University Graduate Scholarship to Commemorate the 72nd Anniversary of His Majesty King Bhumibol Adulyadej)

ทุนวิจัยซึ่งได้รับการสนับสนุนจากโครงการในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100ปี) (Chulalongkorn University Centenary Academic Development Project))

บริษัทสยามปูนซีเมนต์ขาวจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเตรียมวัสดุสำหรับใช้ในงานวิจัย

เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยชีวเคมี คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยสภาวะแวดล้อมแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือวิจัยและวิเคราะห์ผล

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นสถานที่ให้ความรู้ อบรมจริยธรรม และปลูกจิตสำนึกที่ดีแก่ข้าพเจ้า

บิดา มารดา และครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและให้เลี้ยงดูข้าพเจ้ามาตั้งแต่กำเนิด

เพื่อน พี่ น้อง ทันตแพทย์ที่ทำงาน และที่คณะทันตแพทยศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ
กิตติกรรมประกาศ.. ฉ
สารบัญ.. ช
สารบัญตาราง.. ฌ
สารบัญภาพ.. ญ
บทที่ 1 บทนำ.. 1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 6
วัสดุที่ใช้ในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง.. 6
คุณสมบัติทั่วไปของเอ็มทีเอและการนำมาใช้ในการปิดรอยทะลุโพรงเนื้อเยื่อใน..... 7
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์และการนำมาใช้งานทางศาสตร์ของเอ็นโดดอนต์.................. 9
การปรับปรุงคุณสมบัติพอร์ตแลนด์ซีเมนต์.. 11
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.. 14
ประชากร.. 14
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.. 14
การดำเนินการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล.. 16
ตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมสารพอร์ตแลนด์
ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม.. 16
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.. 19
ตอนที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ 19
การดำเนินการวิจัย.. 20
จำนวนประชากร.. 28
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.. 28
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.. 30
ตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมสารพอร์ตแลนด์
ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม.. 30
การศึกษาเวลาแข็งตัว.. 30
การศึกษาคุณสมบัติการไหลแผ่.. 31

หน้า

ตอนที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ 32

การศึกษาเวลาแข็งตัว.......... 33

การศึกษาความทนแรงอัด.......... 33

การศึกษาอุณหภูมิขณะแข็งตัว.......... 34

การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างขณะแข็งตัว.......... 35

การศึกษาหาปริมาณโลหะหนัก.......... 36

การศึกษาขนาดของอนุภาค.......... 37

การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ.......... 38

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.......... 44

อภิปรายผลการวิจัย.......... 44

ข้อเสนอแนะ.......... 51

สรุปผลการวิจัย.......... 51

รายการอ้างอิง.......... 52

ภาคผนวก.......... 65

ภาคผนวก ก.......... 66

ภาคผนวก ข.......... 136

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.......... 141

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	กลุ่มควบคุมและกลุ่มการทดลองในการศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นของโพลีคาร์-บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนของเหลวต่อผงซีเมนต์.........	17
ตารางที่ 2	สรุปจำนวนตัวอย่างที่จะดำเนินการทดสอบในแต่ละหัวข้อการศึกษา...............	28
ตารางที่ 3	ค่าเฉลี่ยเวลาแข็งตัวของวัสดุแต่ละชนิดจากการศึกษาตอนที่ 1.......................	30
ตารางที่ 4	ค่าเฉลี่ยเวลาแข็งตัวของวัสดุแต่ละชนิดจากการศึกษาตอนที่ 2.......................	33
ตารางที่ 5	ค่าเฉลี่ยความทนแรงอัดวันที่ 1 และวันที่ 21 ของวัสดุแต่ละชนิด.....................	34
ตารางที่ 6	ปริมาณโลหะหนักในวัสดุแต่ละชนิด...	37
ตารางที่ 7	ร้อยละเฉลี่ยการกระจายของอนุภาคแยกตามขนาดของวัสดุแต่ละชนิด...........	38
ตารางที่ 8	ร้อยละเฉลี่ยของปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุแต่ละชนิด.................	39

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 เครื่องตรวจสอบการแข็งตัวของซีเมนต์.. 21

ภาพที่ 2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์.. 22

ภาพที่ 3 แม่พิมพ์สำหรับวัสดุที่ใช้ทดสอบความทนแรงอัด... 23

ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮโดรลิก.. 24

ภาพที่ 5 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิในระบบดิจิตอลแบบใช้ขดลวด........................... 25

ภาพที่ 6 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง.. 25

ภาพที่ 7 กราฟแสดงการไหลแผ่ของวัสดุชนิดต่าง ๆ 31

ภาพที่ 8 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุชนิดต่าง ๆ ขณะแข็งตัว..................... 35

ภาพที่ 9 ค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุชนิดต่าง ๆ ขณะแข็งตัว.................................. 36

ภาพที่ 10 การกระจายของอนุภาคแยกตามขนาดของวัสดุแต่ละชนิด............................. 37

ภาพที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ.. 40

ภาพที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา........................... 41

ภาพที่ 13 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม............. 41

ภาพที่ 14 องค์ประกอบทางเคมีของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่น................................ 42

ภาพที่ 15 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น................... 42

ภาพที่ 16 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมสารละลาย
โพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์... 43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสุขภาพช่องปากเป็นหนึ่งในปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญ จากการสำรวจสภาวะสุขภาพช่องปากระดับประเทศครั้งที่ 6 ปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2550 ในกลุ่มตัวอย่างจำนวน 11,531 คนทั่วประเทศ พบว่ากลุ่มเด็กและเยาวชน (อายุ 6 ถึง 12 ปี) มีสภาวะโรคฟันผุในฟันแท้ ร้อยละ 56.87 โดยฟันที่ผุส่วนใหญ่ยังไม่ได้รับการรักษา ร้อยละ 54.20 สภาวะโรคฟันผุมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้นตามลำดับช่วงอายุกล่าวคือ กลุ่มประชากรอายุ 15 ปี กลุ่มประชากรอายุ 35 ถึง 44 ปี และกลุ่มประชากรอายุ 60 ถึง 74 ปี มีสภาวะโรคฟันผุในฟันแท้ร้อยละ 66.33 ร้อยละ 89.57 และร้อยละ 96.15 ตามลำดับ[1] จากรายงานดังกล่าวพบว่าประชากรหลายกลุ่มอายุต้องสูญเสียฟันก่อนวัยอันควร ส่วนหนึ่งมาจากการลุกลามของรอยโรคฟันผุและการติดเชื้อในโพรงเนื้อเยื่อในและอวัยวะรอบปลายรากฟัน การสูญเสียฟันนำมาซึ่งปัญหาหลายประการทั้งปัญหาทางด้านสุขภาพ การดำเนินชีวิต คุณภาพชีวิต รวมถึงงบประมาณที่รัฐต้องสูญเสียไปแต่ละปีเป็นจำนวนมากในการให้บริการการรักษาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

การรักษาเพื่อคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อใน (vital pulp therapy) เป็นหนึ่งในการรักษาเชิงอนุรักษ์เพื่อป้องกันการลุกลามการอักเสบของเนื้อเยื่อในที่มีการอักเสบแบบผันกลับได้ (reversible pulpitis) ป้องกันการเกิดอาการเจ็บปวดจากการอักเสบของเนื้อเยื่อในที่รุนแรงขึ้น การทำลายของเนื้อเยื่อใน การติดเชื้อในระบบคลองรากฟัน การเกิดรอยโรครอบปลายรากฟัน อันจักนำไปสู่การรักษาที่ยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น[2] รวมถึงการสูญเสียฟันก่อนวัยอันควร การปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง (direct pulp capping) เป็นทางเลือกหนึ่งในกระบวนการรักษาเพื่อคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อใน เมื่อเกิดรอยทะลุที่เชื่อมต่อระหว่างโพรงเนื้อเยื่อในและสิ่งแวดล้อมภายในช่องปาก เป็นกระบวนการปิดรอยทะลุที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อด้วยยาหรือซีเมนต์ซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันการลุกลามการอักเสบ รวมถึงส่งเสริมให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการซ่อมแซมและการหายของเนื้อเยื่อ ความสำเร็จของการรักษาการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น สภาวะและรูปแบบการอักเสบของเนื้อเยื่อในก่อนทำการปิดรอยทะลุ สาเหตุที่ทำให้เกิดรอยทะลุ อายุ ขนาดและตำแหน่งที่เกิดรอยทะลุ ขั้นตอนการปิดรอยทะลุทางคลินิก และปัจจัยเกี่ยวกับการบูรณะฟันเพื่อป้องกันการรั่วซึมของแบคทีเรียในช่องปากภายหลังการปิดรอยทะลุ[2,3] Ward ในปีค.ศ. 2002[4] กล่าวถึงวัสดุที่ใช้ในกระบวนการเพื่อคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในว่าควรมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ มีความสามารถในการต่อต้าน

การอักเสบ ไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ และสามารถกระตุ้นให้เกิดการซ่อมแซมและการหายของเนื้อเยื่อในได้

แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการใช้ปิดแผลเนื้อเยื่อใน[5-7] เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นด่างค่อนข้างสูง มีความสามารถในการต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย และสามารถกระตุ้นให้ร่างกายสร้างเนื้อเยื่อแข็งปิดบริเวณรอยทะลุดังกล่าวได้ในเวลาไม่นานนัก ในช่วงระยะแรกที่ยังไม่มีการศึกษาถึงสรีรวิทยาของเนื้อเยื่อใน รวมถึงข้อบ่งใช้ในการปิดแผลเนื้อเยื่อใน (pulp capping) อัตราความสำเร็จของการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง ด้วยแคลเซียมไฮ-ดรอกไซด์มีเพียงร้อยละ 64 และเพิ่มเป็นร้อยละ 80 ถึง 90 เมื่อมีการศึกษาในหัวข้อดังกล่าวมากขึ้น[3,8-10] จากการศึกษาโดยการเก็บข้อมูลย้อนหลังในกลุ่มคนไข้ที่ได้รับการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จำนวน 510 ซี่ ของ Hørsted[10] พบว่าแม้อัตราความสำเร็จของการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงในช่วง 5 ปีแรก มีมากถึงร้อยละ 82 แต่พบแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น นอกจากนี้ภายหลังยังมีการศึกษาและรายงานถึงข้อเสียจากการใช้แคลเซียมไฮ-ดรอกไซด์ในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงมากขึ้น[11-15] การพัฒนาวัสดุที่นำมาใช้ในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงและการคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในจึงยังคงดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง

การพัฒนาวัสดุปิดแผลเนื้อเยื่อในให้มีคุณสมบัติเหมาะสมขึ้น อาจเป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการรักษาการคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อใน และเพิ่มอัตราความสำเร็จของการรักษาในระยะยาว งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาวัสดุปิดแผลเนื้อเยื่อในให้เหมาะสมมากขึ้นในอนาคต ลดอัตราการนำเข้าจากต่างประเทศ และปรับปรุงให้เหมาะสมกับบริบทการใช้งานในประเทศมากที่สุด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาหาความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผสมกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เพื่อนำมาพัฒนาเป็นสารปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง
2. ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ เวลาแข็งตัว ความทนแรงอัด อุณหภูมิขณะแข็งตัว ค่าความเป็นกรด–ด่าง ปริมาณโลหะหนัก (สารหนู สารตะกั่ว แคดเมียม) และ องค์ประกอบทางเคมี ระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ เปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ศึกษาและเปรียบเทียบ ขนาดอนุภาคและส่วนประกอบทางเคมีระหว่าง พอร์ต-แลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ

สมมติฐานการวิจัย

1. สมมติฐานว่าง (H_o) : พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เมื่อผสมด้วยสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ มีคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ เวลาแข็งตัว ความทนแรงอัด อุณหภูมิขณะแข็งตัว ค่าความเป็นกรด–ด่าง ปริมาณโลหะหนัก (สารหนู สารตะกั่ว แคดเมียม) และ องค์ประกอบทางเคมี ไม่แตกต่างจาก พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่น (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เมื่อผสมด้วยสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ มีคุณสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ เวลาแข็งตัว ความทนแรงอัด อุณหภูมิขณะแข็งตัว ค่าความเป็นกรด–ด่าง ปริมาณโลหะหนัก (สารหนู สารตะกั่ว แคดเมียม) และ องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างจาก พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่น (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

2. สมมติฐานว่าง (H_o) : พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม มีขนาดอนุภาคและส่วนประกอบทางเคมีไม่แตกต่างจาก พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มที (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม มีขนาดอนุภาคและส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างจาก พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มที (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 และไวท์โปรรูทเอ็มทีเอในห้องปฏิบัติการ

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ในการเตรียมชิ้นงานและดำเนินการวิจัยจะใช้ผู้ทดลองเพียงคนเดียว

2. กำหนดให้ใช้วัสดุในแต่ละกลุ่มจากรอบการผลิตเดียวกัน และเก็บวัสดุที่ยังไม่ใช้ในสภาวะสุญญากาศซึ่งมีการดูดความชื้นก่อนทำการทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงต่อไปในอนาคตซึ่งจำเป็นต้องได้รับการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการ *(in vitro)* และการทดสอบในสิ่งมีชีวิต *(in vivo)* ก่อนนำไปใช้งานทางคลินิก

2. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพไม่ครอบคลุมในบางหัวข้อ เช่นความทึบรังสี เนื่องจากมีรายงานการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการผสมบิสมัทออกไซด์ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีผลทำให้เวลาแข็งตัวของวัสดุนานขึ้น ความทนแรงอัดลดลง[16] ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะไม่ทำการทดสอบโดยการเติมสารทึบรังสีในวัสดุดังกล่าว ประกอบกับการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงอาจไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความทึบรังสีเทียบเท่าเอ็มทีเอซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน ซึ่งจำเป็นต้องเห็นความแตกต่างทางภาพรังสีอย่างชัดเจนเพื่อตรวจสอบความแนบสนิทในบริเวณดังกล่าวซึ่งอาจมีการบดบังของเสี้ยนใยกระดูก อย่างไรก็ตามอาจจำเป็นต้องศึกษาชนิดและปริมาณสารทึบรังสีที่เหมาะสมในการผสมกับสารปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงต่อไปในอนาคต

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม (Portland cement without gypsum) : พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 ซึ่งไม่ทำการผสมยิปซัมในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (Ordinary white Portland cement) : พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1

โพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ (polycarboxylate superplasticizer) : สารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ในน้ำกลั่น

อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์(liqid/powder ratios) : น้ำหนักของของเหลวหารด้วยน้ำหนักของผงซีเมนต์ ตัวอย่างเช่น น้ำกลั่นปริมาตร 0.33 ลูกบาศก์มิลลิลิตร (มีน้ำหนักเทียบเท่า 0.33 กรัม) ผสมกับเอ็มทีเอน้ำหนัก 1 กรัม อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์เท่ากับ 0.33 กรัม/1 กรัม = 0.33 ทั้งนี้การเปลี่ยนหน่วยปริมาตรเป็นน้ำหนักจากลูกบาศก์มิลลิลิตรเป็นกรัมในสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 1.8 โดยปริมาตร ในกลุ่มการทดลอง จะพิจารณาเปลี่ยนหน่วยโดยใช้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์มิลลิลิตร เนื่องจากความหนาแน่นของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เท่ากับ 1.06 กรัม/ลูกบาศก์มิลลิลิตร (ข้อมูลจากเอกสารกำกับการใช้งานจากบริษัทผู้ผลิต) เมื่อทำการเตรียมสารละลายโพลี-

คาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 1.8 โดยปริมาตร จะสามารถคำนวณได้ค่าความหนาแน่นของสารละลายดังกล่าวเท่ากับ 1.01 กรัม/ลูกบาศก์มิลลิลิตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ช่วยเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ในวัสดุดังกล่าว และเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการนำไปประยุกต์และพัฒนาเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงที่เหมาะสม หรือเป็นวัสดุในการรักษาเพื่อคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อใน ช่วยให้สามารถทำการบูรณะฟันถาวรต่อให้สำเร็จได้ภายในครั้งเดียว ลดโอกาสการติดเชื้อภายในโพรงเนื้อเยื่อในจากการรั่วซึมหรือแตกหักของวัสดุบูรณะชั่วคราวระหว่างการรักษา

วิธีดำเนินการวิจัย

วิจัยเชิงทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

วัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงของฟันควรมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อ มีความสามารถในการต่อต้านการอักเสบ ไม่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อ และสามารถกระตุ้นให้เกิดการหายของเนื้อเยื่อในได้ อย่างไรก็ตามการพัฒนาวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงดังกล่าว จำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการใช้งานทางคลินิกด้วย ถึงแม้ว่าจากการทบทวนวรรณกรรมในปัจจุบันจะพิจารณาให้มิเนอรอลไตรออกไซด์แอกกริเกต หรือ เอ็มทีเอ (Mineral trioxide aggregate; MTA) เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง[17] แต่เนื่องจากเอ็มทีเอมีเวลาการแข็งตัวค่อนข้างยาวนาน ทำให้ไม่สามารถทำการบูรณะฟันถาวรได้ภายในการนัดหมายครั้งเดียว รวมถึงเป็นวัสดุที่มีการใช้งานค่อนข้างยาก มีราคาแพง ผู้ป่วยส่วนใหญ่โดยเฉพาะผู้ป่วยที่อยู่ในชนบทไม่สามารถเข้าถึงการรักษาโดยวัสดุดังกล่าวได้ด้วยเหตุผลเรื่องค่าใช้จ่าย การพัฒนาวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับเอ็มทีเอ แต่มีเวลาการแข็งตัวที่สั้น มีการใช้งานที่ง่าย และราคาถูกจึงมีความสำคัญ และเป็นประโยชน์ รวมถึงเป็นโอกาสลดการนำเข้าเอ็มทีเอจากต่างประเทศและเพิ่มโอกาสการได้รับการรักษาแก่ประชาชนทั่วไปอีกด้วย

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุที่ใช้ในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง และการทำพัลพ์โพโทมี ในช่วงปี ค.ศ. 1930 เนื่องจากมีคุณสมบัติในการเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งปิดบริเวณรอยทะลุโพรงเนื้อเยื่อในได้ รวมถึงคุณสมบัติในการฆ่าเชื้ออันเนื่องมาจากค่าความเป็นกรด–ด่างที่สูง (pH 12.5) อย่างไรก็ตามสารอื่นที่มีค่าความเป็นกรด–ด่างและมีปริมาณไฮดรอก-ไซด์ไอออนใกล้เคียงกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ กลับไม่ทำให้เกิดการตอบสนองเช่นเดียวกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์[18] Schröder ในปีค.ศ. 1985[19] เชื่อว่าการเกิดชั้นเนื้อเยื่อตายบริเวณที่ติดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลรบกวนเนื้อเยื่อในโพรงเนื้อเยื่อในและเหนี่ยวนำให้เกิดขบวนการปกป้องโพรงเนื้อเยื่อในโดยการตกผลึกของเกลือแร่ กลายเป็นเนื้อเยื่อแข็ง ขณะที่ Veis [20] พบว่าชั้นเนื้อเยื่อตายบริเวณที่ติดกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวเป็นตำแหน่งให้เซลล์เนื้อเยื่อในมาเกาะและมีผลต่อการเกิดเนื้อเยื่อแข็งในบริเวณรอยทะลุ

วันแรกภายหลังการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะพบบริเวณชั้นเนื้อเยื่อตาย และเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับขบวนการอักเสบอยู่ติดกับวัสดุที่ใช้ปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง หลังจากนั้นจะเริ่มพบลิ่มเลือด (blood clot) และโครงสร้างเส้นใยคอลลาเจนติดกับบริเวณชั้นเนื้อเยื่อตาย หรือติดกับวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง โดยกระบวนการตกผลึกของเกลือแร่จะเกิดในสัปดาห์ถัดมา และนำไปสู่การสร้างเนื้อเยื่อแข็งในบริเวณดังกล่าว ทั้งนี้เนื้อเยื่อแข็งที่สร้างขึ้นจากการกระตุ้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์มักมีรูพรุนและมีส่วนประกอบของไซโตพลาสซึมของเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (cell inclusion) เป็นจำนวนมาก การมีรูพรุนดังกล่าวอาจนำมาซึ่งการรั่วซึมของวัสดุและส่งเสริมให้เกิดการรั่วซึมของแบคทีเรียในภายหลังได้[21] รวมถึงเป็นช่องทางเชื่อมต่อระหว่างเนื้อเยื่อในและสภาวะแวดล้อมในช่องปาก การที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถละลายตัวได้เมื่อสัมผัสความชื้น อาจเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้เกิดการติดเชื้อซ้ำได้ภายในระยะเวลา 1-2 ปี[21] ทั้งนี้แม้ว่าจะทำการบูรณะฟันถาวรไปแล้ว การปนเปื้อนของแบคทีเรียสามารถเกิดขึ้นได้ผ่านทางแบคทีเรียที่ฝังตัวอยู่ในชั้นสเมียร์ หรือท่อเนื้อฟันที่เปิดอยู่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการรั่วซึมผ่านรอยแยกระหว่างเนื้อฟันและวัสดุบูรณะ ทั้งนี้มีรายงานพบว่าแบคทีเรียสามารถเพิ่มจำนวนภายใต้วัสดุบูรณะได้[22]

นอกจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้ว ยังมีการนำวัสดุกลุ่มอื่นมาใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง เช่น สารยึดติด(bonding agent)[23] ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite)[24] เอ็มโดเกน (emdogain)[25] และ เอ็มทีเอ[26]

คุณสมบัติทั่วไปของเอ็มทีเอและการนำมาใช้ในการปิดรอยทะลุโพรงเนื้อเยื่อใน

มิเนอรอลไตรออกไซด์แอกกริเกต หรือ เอ็มทีเอ ถูกพัฒนาขึ้นโดยมหาวิทยาลัยโลมาลินดา ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1993 และได้รับการรับรองจากสหพันธ์ยา (Federal Drug Administration, FDA) ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ.1998 ในระยะเริ่มแรกถูกนำมาใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันภายหลังการทำศัลยกรรมตัดปลายราก[27] เอ็มทีเอมีส่วนประกอบของไตรแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ไตรแคลเซียมออกไซด์ ซิลิเกตออกไซด์ และอื่น ๆ จากการศึกษาในระยะเวลาต่อมาพบว่าเอ็มทีเอมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการทั้งในแง่ ความแนบสนิทของวัสดุ[27-29] ความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อจากการประเมินโดยการเลี้ยงเซลล์[30-32] การดูการตอบสนองของเนื้อเยื่อในสุนัข[33] ลิง[34] และหนู[35, 36] ทั้งหมดพบว่า เอ็มทีเอมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อและมีการตอบสนองของเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ดี สามารถกระตุ้นและเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งบริเวณปลายรากได้[34] นอกจากนี้ลักษณะการหายของเนื้อเยื่อและการตอบสนองต่อเอ็มทีเอยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับการตอบสนองต่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์[35] เอ็มทีเอถูก

แนะนำให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการใช้อุดย้อนปลายรากฟันภายหลังการทำศัลยกรรมตัดปลายราก[33] อย่างไรก็ตามภายหลังมีการนำเอ็มทีเอมาใช้ในการรักษาคลองรากฟันมากขึ้น เช่น การปิดรูทะลุบริเวณรากฟัน[37,38] การเหนี่ยวนำให้ปลายรากปิด (apexification)[39] รวมถึงมีรายงานการนำเอ็มทีเอมาใช้ในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง[26] และการทำพัลพ์โพโทมี[40-42] เพื่อคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในไว้ จากการศึกษาพบว่าการใช้เอ็มทีเอเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งที่สมบูรณ์ปิดตลอดความยาวของรอยทะลุ โดยไม่พบการอักเสบของเนื้อเยื่อใน[26,43-45] หรือพบการอักเสบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์[46] นอกจากนี้เนื้อเยื่อแข็งที่พบบริเวณรอยทะลุที่ปิดด้วยเอ็มทีเอยังมีความสมบูรณ์มากกว่าเนื้อเยื่อแข็งบริเวณรอยทะลุที่ปิดด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์[46-49] Nair และคณะในปีค.ศ. 2008[46] ได้รายงานถึงผลการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยเอ็มทีเอและไดแคล (Dycal®) (แคลเซียมไฮดรอกไซด์เพสต์) พบว่าในระยะเวลา 3 เดือนแรก เนื้อเยื่อแข็งบริเวณรอยทะลุที่ปิดด้วยเอ็มทีเอมีความหนาและสมบูรณ์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ปิดด้วยไดแคล นอกจากนี้ เนื้อเยื่อแข็งที่ถูกกระตุ้นด้วยไดแคลยังมีรูพรุนมากมาย และพบการอักเสบแบบเฉียบพลันบริเวณเนื้อเยื่อในที่สัมผัสกับไดแคลได้นานถึง 3 เดือน ขณะที่ Bogen และคณะในปีค.ศ. 2008[50] รายงานความสำเร็จของการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยเอ็มทีเอ ในฟันของผู้ป่วยที่มีรอยผุทะลุโพรงเนื้อเยื่อในจำนวน 49 ซี่ พบว่าในระยะเวลา 1 ถึง 9 ปีภายหลังการติดตามผลการรักษา ร้อยละ 97.96 ของฟันที่ปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยเอ็มทีเอไม่มีอาการทางคลินิกและไม่มีรอยโรคทางภาพรังสี ขณะที่ร้อยละ 82 สามารถตรวจพบเนื้อเยื่อแข็งที่สร้างต่อจากรอยทะลุโพรงเนื้อเยื่อในได้จากภาพรังสี และฟันทุกซี่ (ร้อยละ 100) ที่เคยมีปลายรากฟันเปิดกว้างขณะปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง มีกระบวนการสร้างรากฟันต่อจนปลายรากฟันปิดโดยสมบูรณ์

นอกจากนี้ เอ็มทีเอยังเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการต่อต้านการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์[51] ส่งเสริมกระบวนการเลื่อนตำแหน่ง (migration) และการเปลี่ยนสภาพ (differentiation) ของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเนื้อเยื่อแข็งในโพรงเนื้อเยื่อใน[52] ส่งเสริมเซลล์ให้ลดระดับการผลิตไซโทไคน์ (cytokine) ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอักเสบ[53-55] ส่งเสริมการเกิดการตกผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์และคาร์บอเนตอะพาไทต์ (carbonateapatite)[56-58] เมื่อพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติอื่น ๆ เช่นความแนบสนิทของวัสดุและ ความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ เอ็มทีเอจึงเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่มีอยู่ในปัจจุบัน[59]

อย่างไรก็ตามการที่เอ็มทีเอมีราคาสูงมาก[59,60] มีคุณสมบัติการใช้งานที่ค่อนข้างยาก[59-61] และมีระยะเวลาการแข็งตัวค่อนข้างนาน ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในปัจจุบัน[59] โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์และการนำมาใช้งานทางศาสตร์ของเอ็นโดดอนต์

เอ็มทีเอประกอบด้วย พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ร้อยละ 80 และบิสมัทออกไซด์ร้อยละ 20 เพื่อเพิ่มความทึบรังสี[62,63] โดยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีส่วนประกอบหลักคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate) และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracalcium aluminoferrite) คล้ายคลึงกับเอ็มทีเอ มีปฏิกิริยาการแข็งตัวไฮเดรชันที่คล้ายคลึงกัน[64] จากการศึกษาเพิ่มเติมโดยการวิเคราะห์ส่วนประกอบในระดับมหภาค (macroscopic) และจุลภาค (microscopic) ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction analysis) พบว่าส่วนประกอบของวัสดุทั้งสองมีความคล้ายคลึงกัน[65, 66] ต่างกันที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไม่มีบิสมัทออกไซด์[65-67] ไม่มีโปแทสเซียม[68] และมีแคลเซียมไดอลูมิเนต (calcium dialuminate) และ แคลเซียมซัลเฟตแอนไฮเดรต (calcium sulphate anhydrate) มากกว่าเอ็มทีเอ[69] โดยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อไม่แตกต่างจากเอ็มทีเอ[70,71] มีความสามารถในการฆ่าเชื้อเช่นเดียวกับเอ็มทีเอ[72] และสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งได้เช่นเดียวกับเอ็มทีเอ[73] ทั้งนี้แคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อได้รับความชื้นจะกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และทำปฏิกิริยาต่อกับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) จากเนื้อเยื่อในกลายเป็นผลึกแคลไซต์ (calcite crystals) และเริ่มตกตะกอนสะสมกับโครงสร้างไฟโบรเนกทินนอกเซลล์ (extracellular network of fibronectin) ทำให้เกิดการสะสมของชั้นเนื้อเยื่อแข็ง ขณะที่ Min และคณะในปีค.ศ. 2007[74] พบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการแสดงออกของเอ็มอาร์เอ็นเอส์ (mRNAs) ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตโปรทีนในการสร้างเนื้อฟัน (dentin-specific protein) และโปรทีนที่ไม่มีคอลลาเจนเป็นส่วนประกอบ (non-collagenous protein) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อแข็งในเซลล์ทดลอง จากการศึกษาของ Menezes และคณะในปีค.ศ. 2004[75,76] พบว่าภายหลังการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงในสุนัขจำนวน 19 ซี่ด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวเป็นเวลา 120 วัน ฟันที่ทำการทดสอบทั้งหมดมีการตอบสนองโดยการสร้างเนื้อเยื่อแข็งปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงค่อนข้างหนา รวมถึงมีเซลล์สร้างเนื้อฟัน (odontoblast) ยึดเกาะเนื้อเยื่อแข็งที่สร้างมีความสมบูรณ์และทำให้เกิดความแนบสนิทได้เป็นอย่างดี ไม่พบสภาวะการอักเสบ หรือการตายของเนื้อเยื่อทั้งในกลุ่มที่ปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยเอ็มทีเอแองเจลัส (MTA Angelus) และ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว สอดคล้องกับการศึกษาของ Razmi และคณะในปีค.ศ.

2006[77] ที่ไม่พบความแตกต่างในแง่ความหนาของเนื้อเยื่อแข็งบริเวณที่ปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง และระดับการอักเสบของเนื้อเยื่อในของสุนัขภายหลังการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงด้วยโปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์

การผสมบิสมัทออกไซด์ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพื่อเพิ่มความทึบรังสีนั้นพบว่าไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อเมื่อเทียบกับวัสดุดั้งเดิม[71] แต่อาจมีผลต่อกระบวนการไฮเดรชัน[64] โดยมีผลต่อการตกตะกอนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงการแข็งตัวของวัสดุ อย่างไรก็ตามในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด เช่นในเนื้อเยื่อที่มีการอักเสบ บิสมัท-ออกไซด์สามารถละลายออกมาสู่สภาวะแวดล้อมดังกล่าว และรบกวนการเพิ่มจำนวนของเซลล์ที่อยู่โดยรอบได้[78] ข้อพึงระวังอีกประการหนึ่งในการพิจารณานำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาใช้งานทางคลินิกได้แก่ การปนเปื้อนของเชื้อโรค สารโลหะหนัก และสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ เนื่องจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นซีเมนต์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง ไม่ได้ถูกควบคุมการผลิตด้วยกระบวนการปลอดเชื้อและได้มาตรฐานสำหรับการผลิตยาหรือเคมีภัณฑ์ทางการแพทย์ แม้จะมีการนำซีเมนต์ดังกล่าวมาทำให้ปราศจากเชื้อก่อนใช้งาน แต่สารโลหะหนักบางชนิดอาจยังปะปนอยู่ในซีเมนต์อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตและสารตั้งต้นในธรรมชาติ โดยเฉพาะสารหนู และสารตะกั่ว[79] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Duarte และคณะในปีค.ศ. 2005[80] พบว่าสารหนูที่ปะปนอยู่ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีอยู่น้อยมาก ใกล้เคียงกับปริมาณที่มีอยู่ในเอ็มทีเอ และไม่มีอันตรายต่อการใช้งานทางคลินิก

Danesh และคณะในปีค.ศ. 2006[81] พบว่า เอ็มทีเอมีคุณสมบัติดีกว่าพอร์ต-แลนด์ซีเมนต์โดยมีการละลายตัวน้อยกว่า มีความแข็งแรง และมีความทึบรังสีมากกว่า ในขณะที่หลายการศึกษาพบว่าวัสดุทั้งสองมีคุณสมบัติคล้ายคลึงและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รวมถึงพิจารณาให้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ถือเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าเอ็มทีเอในการใช้งานทางเอนโดดอนติกส์ [68, 70, 75, 80, 82]

สำหรับการนำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาใช้ในมนุษย์ De Deus และ Coutinho-Filho ในปีค.ศ. 2007[83] ได้รายงานผลการรักษาฟันที่มีรอยโรคปลายรากและปลายรากเปิดโดยการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สร้างเป็นวัสดุปิดปลายรากผ่านการกดอัด (apical plug) พบว่ามีการหายของรอยโรคปลายรากสมบูรณ์ และไม่มีอาการทางคลินิกเมื่อเวลาผ่านไป 7 เดือนจึงทำการอุดด้วยเทอร์โมพลาสติกกัตตาเปอร์ชา ในขณะที่ Conti และคณะรายงานผลการรักษาผู้ป่วยสองรายในปีค.ศ. 2009[84] โดยการใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการทำพัลพ์โพโทมี พบว่าให้ผลการตอบสนองที่ดีทั้งทางคลินิกและภาพรังสี โดยฟันทั้งสองซี่ยังคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในไว้ได้

จากองค์ประกอบและคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเอ็มทีเอ จึงอาจสามารถนำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาใช้ในงานรักษาคลองรากฟันรวมถึงการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงทดแทนเอ็มทีเอได้ ทั้งนี้เนื่องจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีราคาถูกกว่าเอ็มทีเอประมาณหนึ่งแสนสองหมื่นห้าพันเท่า[85] การพัฒนาพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้มีความเหมาะสมในการใช้งานทางคลินิกอาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาในการใช้งานรักษาคนไข้ต่อไป

อย่างไรก็ตามพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ยังไม่สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของเอ็มทีเอในแง่คุณสมบัติการใช้งานที่ค่อนข้างยาก และระยะเวลาการแข็งตัวที่ยาวนานได้ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้งานทางคลินิก ระยะเวลาการแข็งตัวที่ยาวนานทำให้ไม่สามารถปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงและบูรณะฟันถาวรให้เสร็จได้ภายในครั้งเดียวกัน จึงเพิ่มโอกาสการติดเชื้อภายในโพรงเนื้อเยื่อในเนื่องจากการรั่วซึมหรือแตกหักของวัสดุบูรณะชั่วคราวระหว่างการรักษา

การปรับปรุงคุณสมบัติพอร์ตแลนด์ซีเมนต์

หลายการศึกษาพยายามพัฒนาปรับปรุงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพื่อแก้ไขระยะเวลาการแข็งตัวที่ยาวนานในการใช้งานของเอ็มทีเอ โดยการผสมเกลืออนินทรีย์เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride)[86,87] แคลเซียมฟอร์เมต (calcium formate)[86] แคลเซียมไนไตรต์ผสมแคลเซียมไนเตรต (calcium nitrite/ calcium nitrate)[86] ลงในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ อย่างไรก็ตามระยะเวลาการแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมแคลเซียมคลอไรด์ยังยาวนานอยู่ (35 นาทีถึง 125 นาที)[86,87] และอาจไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงและบูรณะฟันถาวรให้เสร็จภายในครั้งเดียวกันได้ นอกจากนี้การผสมแคลเซียมคลอไรด์เพื่อลดระยะเวลาการแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์หรือเอ็มทีเอยังทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นทันทีหลังผสม[88] รวมถึงทำให้เกิดการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนออกมาเป็นจำนวนมากกว่าปกติ[88] ค่าความเป็นกรด-ด่างและแคลเซียมไอออนที่เพิ่มมากขึ้น อาจรบกวนการเจริญเติบโตหรือการทำงานของเซลล์ โดยเฉพาะในกรณีการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงซึ่งจะมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างวัสดุและเนื้อเยื่อใน

ระยะเวลาการแข็งตัวที่ยาวนานของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เกิดจากการผสมยิปซัม (แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต:$CaSO_4.2H_2O$) เข้าไปในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิต โดยเม็ดปูน (clinker) ที่ได้จากการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วหลังกระบวนการเผาจะถูกนำไปบดรวมกับยิปซัมคุณภาพสูง[89,90] ทั้งนี้ยิปซัมในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทำหน้าที่หน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต โดยการเกิดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) ซึ่งไม่

ละลายน้ำก่อนเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบของไตรแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตในภายหลัง หาก ไม่มียิปซัมสำหรับหน่วงปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์แล้ว ไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะเกิดปฏิกริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วและรุนแรงทำให้เกิดการปลดปล่อย พลังงานความร้อนออกมาอย่างรวดเร็วขณะซีเมนต์แข็งตัว รวมถึงมีการแข็งตัวและสูญเสีย คุณสมบัติการปั้นแต่งและสภาพพลาสติก (plasticity) อย่างรวดเร็ว หรือเกิดปรากฏการณ์ที่ เรียกว่าแฟลชเซท (flash set)[89] ทำให้ไม่สามารถทำงานได้ อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าว สามารถแก้ไขได้โดยการใส่โพลีเมอร์ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ หรือผสมซุปเปอร์พลาสติไซ-เซอร์ (superplasticizer)[89] ลงในของเหลวที่ใช้ในการผสมปูน ทั้งนี้นอกจากซุปเปอร์พลาสติไซ-เซอร์จะช่วยแก้ปัญหาการเกิดแฟลชเซทแล้ว ยังช่วยให้เม็ดปูนเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ได้มากขึ้น สามารถลดปริมาณน้ำโดยที่ค่ายุบตัวและปริมาณพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ยังคงเท่าเดิม และสามารถ ทำงานได้ง่ายขึ้น[91,92] จากการศึกษาของ Camilleri และคณะในปีค.ศ. 2005[71] และปีค.ศ. 2008[16]พบว่าการผสมซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ในปูนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมสามารถ ลดเวลาการแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (จาก 270 ± 8.3 นาที ถึง 468 ± 12.3 นาที เหลือเพียง 5 ± 0.4 นาที ถึง 8 ± 1.2 นาที) โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทาง กายภาพอื่น ๆ ที่เหลือ[16] ซึ่งได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความทนแรงอัด และการดูดน้ำ รวมถึงไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อ เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีเมทิลเต-ตราโซเลียม:เอ็มทีที (methyltetrazolium: MTT assay) ที่เวลา 24, 48 และ 72 ชั่วโมง[71] พอร์ต-แลนต์ซีเมนท์ที่มีระยะเวลาการแข็งตัวสั้นลงนี้เรียกว่า แอ็คเซเลเรทเทดพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (accelerated Portland cement) หรือพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดแข็งตัวเร็ว

โพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เป็นซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์รุ่นที่สามซึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1981-1995[93] โดยเป็นสารผสมเพิ่ม (admixtures) ที่ได้รับความนิยม และใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากคุณสมบัติโดดเด่นในการปรับปรุงลักษณะทาง กายภาพของซีเมนต์ให้มีคุณภาพดีขึ้น รวมถึงความไม่เป็นพิษและปลอดภัยต่อสุขภาพ[94] โพลี-คาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เป็นโพลีเมอร์ขนาดใหญ่ที่สามารถละลายในน้ำได้ (มวล โมเลกุลประมาณ 20,000-30,000 ดาลตัน)[92] โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยสายไฮโดรคาร์บอน ขนาดยาวซึ่งมีกรดโพลีคาร์บอกซีลิกเป็นสายโซ่หลัก (backbone) และมีสายกิ่งซึ่งประกอบด้วย โครงสร้างที่มีประจุลบเป็นจำนวนมาก เช่น หมู่โพลีออกซีอัลคีลีน (polyoxyalkylene group)[94] หมู่ คาร์บอกซิล (carboxyl group) หรือ หมู่อีเทอร์ (ether group)[95] ลักษณะโพลีเมอร์ที่มีสายโซ่หลัก ยาวและมีสายโพลีเมอร์กิ่งจำนวนมากยื่นออกมาทำให้โพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ ถูกจัดอยู่ในกลุ่มโพลีเมอร์รูปหวี (comb polymer)[92, 95]

ในการดำเนินปฏิกิริยาไฮเดรชันของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์สามารถหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไตร-แคลเซียมอลูมิเนต[89,96] โดยสามารถจับกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตและผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้รวดเร็วกว่า ทั้งนี้ในสภาวะที่ปราศจากยิปซัมหรือมีหมู่ซัลเฟตน้อยโพลีคาร์-บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์จะเข้าหน่วงปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนตโดยการแทรกตัวระหว่างชั้นของผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันคล้ายคลึงกับการทำงานของยิปซัม[97] และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อเวลาผ่านไป 6 วัน[98] ทั้งนี้ความสามารถในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับความยาวของสายกิ่งโพลีเมอร์ที่เกาะอยู่บนสายไฮโดรคาร์บอนหลัก[96,99] นอกจากนั้นเนื่องจากโครงสร้างของโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีประจุลบเป็นจำนวนมาก จึงช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำในขณะที่ช่วยผลักอนุภาคของเม็ดปูนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้กระจายตัวออกจากกัน ช่วยให้การผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทำได้ง่ายขึ้น รวมถึงวัสดุมีคุณสมบัติการไหลแผ่ที่ดีขึ้น ใช้น้ำในการดำเนินไปของปฏิกิริยาน้อยลง เป็นผลให้ซีเมนต์มีความแข็งแรง และความทนแรงอัดเพิ่มมากขึ้น ประหยัดปริมาณพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการผสมลงได้ร้อยละ 10 รวมถึงลดปริมาณความร้อนขณะแข็งตัวอีกด้วย[91, 92]

จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงอาจสามารถใช้สารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์-พลาสติไซเซอร์ผสมในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงต่อไปในอนาคต ประกอบกับการศึกษาในสาขาทันตแพทยศาสตร์ยังขาดองค์ความรู้พื้นฐานในวัสดุดังกล่าวอยู่มาก งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อช่วยเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ดังกล่าว สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานต่อการศึกษาวัสดุดังกล่าวต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ประชากร

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

1. เอ็มทีเอ ผลิตภัณฑ์ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ (White ProRoot MTA (MTA) (Dentsply, Tulsa Dental Product, Tulsa, OK, USA))
2. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (Ordinary white Portland cement: OWPC) พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 ซึ่งได้รับรองจากมาตรฐานอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก.)เลขที่ 133 (มอก. 133-2518 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ขาว) ผลิตภัณฑ์ช้างเผือก ผลิตโดย บริษัทสยามปูนซีเมนต์ขาว จำกัด (The siam White Cement Co., LTD, Bangkok, Thailand)
3. พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดปราศจากยิปซัม (Accelerated white Portland cement: AWPC) ผลิตโดยห้องปฏิบัติการของบริษัทสยามปูนซีเมนต์ขาว จำกัด
4. โพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ (Polycarboxylate superplasticizer: PC) ผลิตภัณฑ์ซิก้า วิสโคครีต-10 (Sika® ViscoCrete® -10) ผลิตโดยบริษัทซิก้า จำกัด (Sika [Thailand] Limited, Cholburi, Thailand) ภายใต้การควบคุมมาตรฐานตาม EN 934-2 เกี่ยวกับคุณสมบัติลดน้ำอย่างมากและควบคุมการแข็งตัว
5. น้ำกลั่น
6. น้ำปราศจากอิออนระดับ 2 ตามมาตรฐานไอเอสโอ 3696 (1987)
7. สารละลายกรดไนตริก ชนิดสำหรับงานวิเคราะห์ (LAB-SCAN, Bangkok, Thailand)
8. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ชนิดสำหรับงานวิเคราะห์ (MERK SA, Rio de Janeiro, Brazil)
9. สารละลายเอทานอล
10. กระดาษตวงสาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องตรวจสอบการแข็งตัวของซีเมนต์ (ผลิตโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (Medical& Environmental Euipment Research Laboratory, KMIT, Bangkok, Thailand)
2. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (temperature and humidity controlled chamber) (ผลิตโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. เครื่องกำจัดความชื้น (dessicator)
4. เครื่องทดสอบความทนแรงอัด ผลิตภัณฑ์ Instron 8872 (Instron Ltd., Buckinghamshire, UK.)
5. เครื่องวัดระยะแบบดิจิตอล (digital caliper) (Mituyota, Kawasaki, Japan)
6. เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิในระบบดิจิตอลแบบใช้ขดลวด (thermocouple with recorder) รุ่น 407401 (Extech Instruments Corporation, Waltham, MA, USA)
7. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) ผลิตภัณฑ์ Orion 420A (Orion research Inc., Boston, MA, USA)
8. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน (atomic absorption microscopy (AAnalyst 800, PerkinElmer Inc., Shelton, CT, USA.))
9. เครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (laser particle size distribution analyzer (Malven Instrument Ltd. Malvern, UK.))
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ผลิตภัณฑ์ JEOL, JSM5410LV (JEOL Ltd., Japan)
11. เครื่องเอกซเรย์ฟลูโอเรสเซนส์ สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer) (EDS; ISIS300-6647, Oxford Instruments, Wycombe Bucks, UK.)
12. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) ผลิตภัณฑ์ Bruker (Bruker AXS Model D8 Discover, Karlsruhe, Germany)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

13. แม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 มิลลิเมตร สูง 1.0 มิลลิเมตร ผลิตจากปูนปลาสเตอร์ โดยการเตรียมแม่พิมพ์ทำตามคำแนะนำที่ระบุในมาตรฐานไอเอสโอ 6876 (2001)
14. แม่พิมพ์โลหะไร้สนิมแบบแยกส่วนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.0 มิลลิเมตร สูง 6.0 มิลลิเมตร
15. แผ่นแก้วรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้างxยาว 40.0x40.0 มิลลิเมตร หนา 5.0 มิลลิเมตร หนัก 20.00 ± 0.20 กรัม จำนวน 2 แผ่น
16. ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานหนัก 100.00 ± 1.00 กรัม
17. ขวดแก้วปากกว้าง
18. หลอดแก้ว
19. เครื่องชั่งสารทศนิยม 3 ตำแหน่ง
20. เครื่องชั่งสารทศนิยม 5 ตำแหน่ง
21. นาฬิกาจับเวลาเป็นวินาที
22. พายโลหะผสมสาร
23. แผ่นแก้วผสมสาร
24. ช้อนตวงสาร
25. หลอดวัดและถ่ายของเหลวอัตโนมัติ (autopipette) ช่วงความละเอียด 100-1000 ไมโครลิตร ผลิตภัณฑ์ Transferpette (BRAND GMBH + CO KG, Wertheim, Germany)

การดำเนินการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ตอนที่ 1 : การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมสารพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

ดำเนินการศึกษา เพื่อพิจารณาหาความเข้มข้นของสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ รวมถึงอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผสมวัสดุเพื่อนำไปศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพในด้านอื่น ๆ ต่อไป เนื่องจากการผสมสารละลายโพลีคาร์บอก-ซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์อาจเปลี่ยนแปลงเวลาการแข็งตัว เพิ่มคุณสมบัติการไหลแผ่ ในขณะที่ลดปริมาณของเหลวที่ใช้ในการผสมวัสดุ การปรับความเข้มข้นของสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์จึงมีความจำเป็นต่อการพัฒนาวัสดุ ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้ทางคลินิกในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ กับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม จะทำการเตรียมส่วนของเหลวโดยการผสมโพลีคาร์บอกซิเลตซุปเปอร์-พลาสติไซเซอร์ในน้ำกลั่น ให้ได้สารละลายเจือจางโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ความเข้มข้นร้อยละ 1.2 ร้อยละ 1.8 และ ร้อยละ 2.4 โดยปริมาตร (ตามบริษัทผู้ผลิตแนะนำ) นำไปผสมกับส่วนผงบนแผ่นแก้วสะอาดด้วยพายผสมพลาสติก ออกแรงผสมให้วัสดุเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้ถึงแม้ว่าบริษัทผู้ผลิตไวท์โปรรูทเอ็มทีเอจะแนะนำให้ใช้อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์เท่ากับ 0.33 โดยน้ำหนักในการผสมเอ็มทีเอ แต่เนื่องจากสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์มีความสามารถในการลดปริมาณของเหลวที่ใช้ในการผสมวัสดุ ในการศึกษาตอนที่ 1 จึงทำการผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์กับพอร์ต-แลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมโดยใช้อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.27 0.30 และ 0.33 โดยน้ำหนัก

การศึกษาตอนที่ 1 นี้จะพิจารณาศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพในสองหัวข้อได้แก่ เวลาการแข็งตัว และคุณสมบัติการไหลแผ่ โดยดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานไอเอสโอ 6876 (2001) ทำการเปรียบเทียบระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยมีพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่นเป็นกลุ่มควบคุม และจะทำการเปรียบเทียบวัสดุแต่ละชนิดในอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่แตกต่างกัน ตามรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลุ่มควบคุมและกลุ่มการทดลองในการศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซี-เลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์

วัสดุ / อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์	0.33	0.30	0.27
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น (กลุ่มควบคุม)	กลุ่มที่ 1	กลุ่มที่ 2	กลุ่มที่ 3
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมน้ำกลั่น	กลุ่มที่ 4	กลุ่มที่ 5	กลุ่มที่ 6
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์-บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 1.2	กลุ่มที่ 7	กลุ่มที่ 8	กลุ่มที่ 9
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์-บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ1.8	กลุ่มที่ 10	กลุ่มที่ 11	กลุ่มที่ 12
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์-บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 2.4	กลุ่มที่ 13	กลุ่มที่ 14	กลุ่มที่ 15

1.1 <u>การศึกษาเวลาแข็งตัว</u>

ดำเนินการทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 6876 (2001) โดยในมาตรฐานดังกล่าวกำหนดให้ใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากปูนพลาสเตอร์สำหรับวัสดุที่ต้องการความชื้นในการแข็งตัว

สร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากปูนพลาสเตอร์รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 มิลลิเมตร สูง 1.0 มิลลิเมตร พันด้วยผ้าก็อซชื้น เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบเพื่อป้องกันปัญหาการดูดน้ำจากวัสดุขณะทำการทดสอบ ดำเนินการทดสอบเวลาแข็งตัวภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 เช่นเดียวกัน

ผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยพายโลหะบนแผ่นแก้วที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) ให้เนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 40 วินาที จากนั้นนำวัสดุที่ผสมแล้วบรรจุเข้าแม่พิมพ์ซึ่งอยู่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ทำการเขย่าในแนวระนาบและปาดวัสดุส่วนเกินให้เรียบด้วยแผ่นกระจกความหนา 1.0 มิลลิเมตรให้เสร็จภายในเวลา 20 วินาที เมื่อใกล้ถึงเวลาแข็งตัวโดยประมาณการ ทำการเลื่อนเข็มวัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ± 0.1 มิลลิเมตร น้ำหนัก 100.00 ± 0.50 กรัมซึ่งติดอยู่กับเครื่องตรวจการแข็งตัวของซีเมนต์ลงในแนวดิ่งอย่างระมัดระวังให้หน้าตัดของเข็มสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ บันทึกเวลาที่หน้าตัดของเข็มดังกล่าวไม่ทำให้เกิดรอยใด ๆ บนวัสดุ เวลาดังกล่าวให้นับเป็นเวลาแข็งตัวของวัสดุที่ทำการทดสอบ ทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในทุกกลุ่มตัวอย่าง นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1.2 <u>การศึกษาคุณสมบัติการไหลแผ่</u>

ดำเนินการทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 6876 (2001) ผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยพายโลหะบนแผ่นแก้วที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) ให้มีเนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 40 วินาที ชั่งน้ำหนักสารที่มีน้ำหนักเทียบเท่าวัสดุปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร วางตรงกลางแผ่นแก้วรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกว้างxยาว 40.0x40.0 มิลลิเมตร หนา 5.0 มิลลิเมตร หนัก 20.00 ± 0.20 กรัม วางแผ่นแก้วรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสอีกแผ่นที่มีรูปร่างและน้ำหนักเท่ากันทับบนวัสดุดังกล่าว เมื่อเวลาผ่านไป 120 วินาทีหลังเริ่มผสม ใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 100.00 ± 1.00 กรัม วางทับบนแผ่นแก้วอีกทีหนึ่ง

นำตุ้มน้ำหนักออกเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีหลังผสมวัสดุ วัดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดและแคบที่สุดของแผ่นวัสดุที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดขนาดแบบดิจิตอล (ความละเอียด

0.01 มิลลิเมตร) คำนวณหาค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อแสดงถึงความสามารถของวัสดุในการไหลแผ่ ทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในทุกกลุ่มตัวอย่าง นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS 17.0 (Statistical Package for the Social Sciences: SPSS Inc., Chicago, IL, USA) วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของเวลาแข็งตัว และคุณสมบัติการไหลแผ่ โดยทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูล พิจารณาใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way analysis of variance) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Multiple comparison test) ด้วย บอนเฟอโรนี (Bonferroni) ในกรณีที่ข้อมูลมีความแปรปรวนเท่ากัน หรือใช้แทมเฮน (Tamhane) ในกรณีที่ข้อมูลมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน

สรุปผลการศึกษา

การศึกษาในตอนที่ 1 นี้ทดสอบเพื่อพิจารณาหาความเข้มข้นของสารละลายโพลี-คาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม พบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลี-คาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 1.8 โดยปริมาตรด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.30 โดยน้ำหนัก สามารถลดเวลาการแข็งตัวและเพิ่มคุณสมบัติการไหลแผ่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น (p<0.05) นอกจากนี้ความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ดังกล่าวสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้มีเวลาการแข็งตัวอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาทำเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงได้ (7.07 ± 0.51 นาที)

รายละเอียดผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูลตอนที่ 1 แสดงรายละเอียดในบทที่ 4 และภาคผนวกของวิทยานิพนธ์

ตอนที่ 2 : การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ

การศึกษาตอนที่ 2 นี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ เวลาการแข็งตัว ความทนแรงอัดในวันที่ 1 และวันที่ 21 อุณหภูมิขณะแข็งตัว ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ขณะแข็งตัว การปนเปื้อนของโลหะหนัก การกระจายของขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมี โดยเปรียบเทียบระหว่าง พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมกับ ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และพอร์ต-แลนด์ซีเมนต์ธรรมดา(พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1)

การเตรียมวัสดุในกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง

กลุ่มที่ 1 : ผสมไวท์โปรรูทเอ็มทีเอกับน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.33 โดยน้ำหนัก (ตามบริษัทผู้ผลิตแนะนำ) (กลุ่มควบคุม)

กลุ่มที่ 2 : ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา กับน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.30 โดยน้ำหนัก

กลุ่มที่ 3 : ผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมกับโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ ร้อยละ1.8 โดยปริมาตร ด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.30 โดยน้ำหนัก (ความเข้มข้นของสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์สำหรับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมได้มาจากการศึกษาตอนที่ 1)

การดำเนินการวิจัย

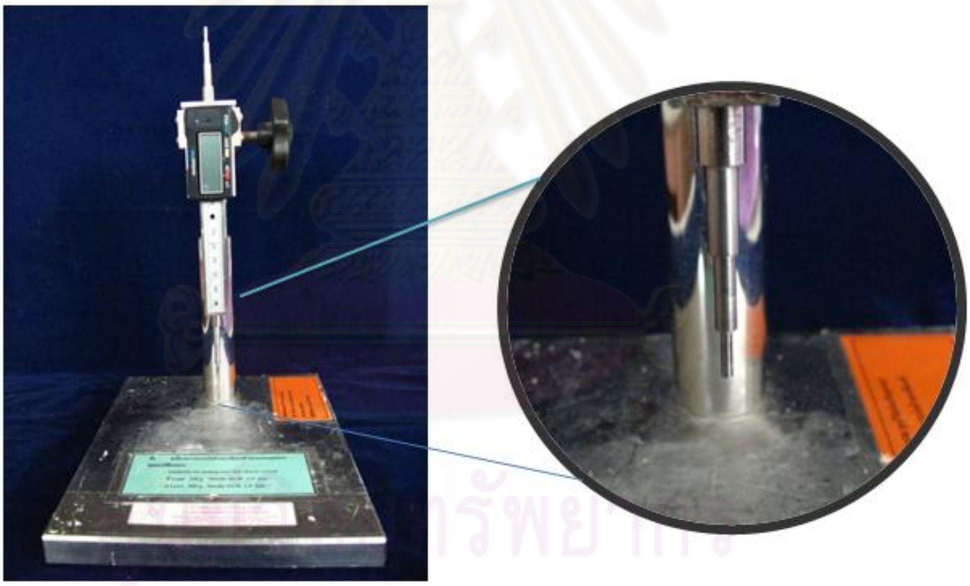
2.1 <u>**การศึกษาเวลาแข็งตัว**</u>

ดำเนินการทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 6876 (2001) โดยในมาตรฐานดังกล่าวกำหนดให้ใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากปูนพลาสเตอร์สำหรับวัสดุที่ต้องการความชื้นในการแข็งตัว ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน ANSI/ADA หมายเลข 57 โดยกำหนดให้ใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากปูนพลาสเตอร์ในการทดสอบเวลาแข็งตัวทั้งวัสดุที่ต้องการความชื้นในการแข็งตัว และวัสดุที่ไม่ต้องการความชื้นในการแข็งตัว

สร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากปูนพลาสเตอร์ตามคำแนะนำในมาตรฐาน ไอเอสโอ 6876 (2001) โดยมีช่องว่างรูปร่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 มิลลิเมตร และสูง 1.0 มิลลิเมตรในแม่พิมพ์ดังกล่าว เพื่อป้องกันปัญหาการดูดน้ำจากวัสดุขณะทำการทดสอบ แม่พิมพ์จะถูกพันด้วยผ้าก็อซชื้นและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ ดำเนินการทดสอบเวลาแข็งตัวภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 เช่นเดียวกัน

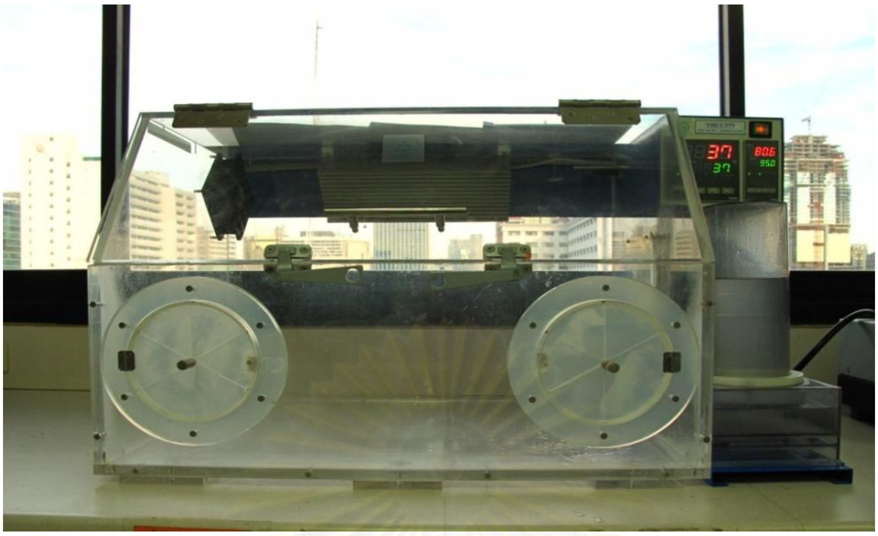
ทำการผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยพายโลหะบนแผ่นแก้วที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 1 องศาเซลเซียส) ให้เนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 40 วินาที จากนั้นนำวัสดุที่

ผสมแล้วบรรจุเข้าแม่พิมพ์ซึ่งอยู่ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ทำการเขย่าในแนวระนาบและปาดวัสดุส่วนเกินให้เรียบด้วยแผ่นกระจกความหนา 1.0 มิลลิเมตรให้เสร็จภายในเวลา 20 วินาที เมื่อใกล้ถึงเวลาแข็งตัว(จากการศึกษาในตอนที่ 1) ทำการเลื่อนเข็มวัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ± 0.1 มิลลิเมตร น้ำหนัก 100.00 ± 0.50 กรัมซึ่งติดอยู่กับเครื่องตรวจการแข็งตัวของซีเมนต์ลงในแนวดิ่งอย่างระมัดระวังให้หน้าตัดของเข็มสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ บันทึกเวลาที่หน้าตัดของเข็มดังกล่าวไม่ทำให้เกิดรอยใด ๆ บนวัสดุ นับเวลาดังกล่าวให้เป็นเวลาแข็งตัวของวัสดุที่ทำการทดสอบ ทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 1 (เอ็มทีเอ ซึ่งใช้เป็นกลุ่มควบคุม) และ 10 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 2 และ 3 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 1 เครื่องตรวจสอบการแข็งตัวของซีเมนต์



ภาพที่ *2* ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

2.2 <u>**การศึกษาความทนแรงอัด**</u>

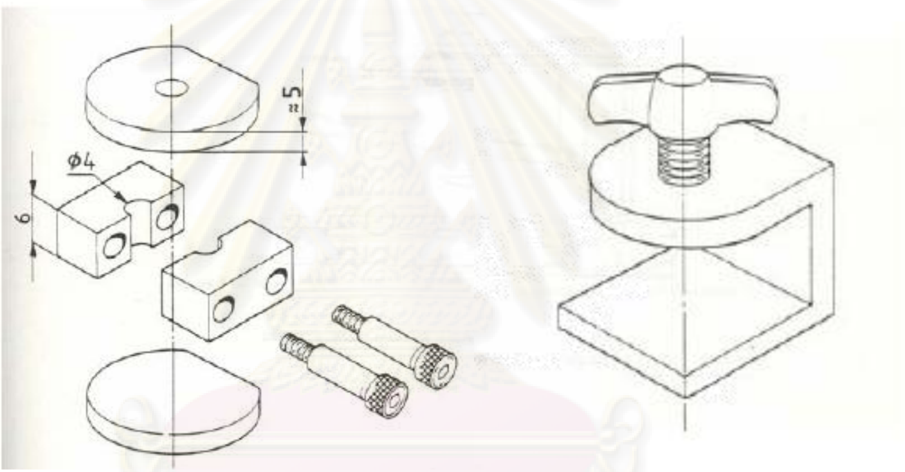
ดำเนินการทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 9917-1 (2007) โดยทำการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยพายโลหะบนแผ่นแก้วให้มีเนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 60 วินาที นำวัสดุใส่ลงในแม่พิมพ์แบบวงแหวนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมแยกส่วนได้ซึ่งมีการทาวาสลีนเคลือบไว้ก่อนเป็นชั้นบาง แม่พิมพ์ดังกล่าวมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.0 ± 0.1 มิลลิเมตร สูง 6.0 ± 0.1 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3 นำแม่พิมพ์วางบนเครื่องเขย่า (mixer) เพื่อกำจัดหรือลดฟองอากาศในเนื้อวัสดุประมาณ 5 วินาที ปาดวัสดุส่วนเกินและประกบแม่พิมพ์ด้วยแผ่นกระจกหนา 1.0 มิลลิเมตร ยึดชิ้นงานด้วยตัวยึดสกรูจนแน่น แล้วเก็บชิ้นงานดังกล่าวไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงนำตัวอย่างวัสดุออกจากแม่พิมพ์ ตรวจหาจุดบกพร่องของชิ้นงาน ชิ้นงานที่ตรวจพบข้อบกพร่องเช่นฟองอากาศจะถูกคัดออกและไม่นำมาศึกษาต่อ

ชิ้นงานที่ไม่มีรอยตำหนิ นำไปแช่ในน้ำปราศจากอิออน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วันและ 21 วันนับจากตอนเริ่มผสมวัสดุ เมื่อครบระยะเวลาตามที่กำหนด นำตัวอย่างชิ้นงานออกมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่องวัดขนาดแบบดิจิตอล (digital caliper) (ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร) ก่อนทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮโดรลิก (servo hydraulic system) รุ่น 8872 อินสตรอน (Instron 8872,Instron Ltd.,Buckinghamshire,UK.) ปรับหัวกดให้มีอัตราเร็ว 0.75 มิลลิเมตรต่อนาที (เทียบเท่าอัตรา

การให้แรง 50 นิวตันต่อนาที) บันทึกค่าแรงที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักในหน่วยนิวตันแล้วนำไปคำนวณตามสูตร

$$C = 4P/\P D^2$$

กำหนดให้ P เป็นแรงที่มากที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก(หน่วยเป็นนิวตัน) D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) คำนวณหา C ซึ่งเป็นค่าความทนแรงอัด(หน่วยเป็นเมกะปาสกาล) ทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 1(เอ็มทีเอ ซึ่งใช้เป็นกลุ่มควบคุม) และ 10 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 2 และ 3 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05



***ภาพที่** 3* แม่พิมพ์สำหรับวัสดุที่ใช้ทดสอบความทนแรงอัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัดระบบไฮโดรลิก

2.3 **<u>การศึกษาอุณหภูมิขณะแข็งตัว</u>**

ทำการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยพายโลหะบนแผ่นแก้วให้เนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 40 วินาที นำวัสดุใส่ลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 มิลลิเมตร สูง 2.0 มิลลิเมตร วัดอุณหภูมิของวัสดุและแม่พิมพ์ซิลิโคนด้วยเครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิในระบบดิจิตอลแบบใช้ขดลวด (thermocouple with recorder) รุ่น 407401 (Extech Instruments Corporation,Waltham,MA,USA) ทุก 2 นาที จนครบ 60 นาทีหลังผสม (ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส) คำนวณอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุและแม่พิมพ์ในแต่ละช่วงเวลา (อุณหภูมิของวัสดุลบกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์) ค่าที่ได้แสดงถึงความร้อนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการดำเนินไปสำหรับปฏิกริยาของวัสดุ โดยค่าบวกหมายถึงการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีการคาย-ความร้อน ขณะที่ค่าลบหมายถึงการดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีการดูดความร้อน ทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 1 (เอ็มทีเอ ซึ่งใช้เป็นกลุ่มควบคุม) และ 10 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 2 และ 3 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภาพที่ 5 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิในระบบดิจิตอลแบบใช้ขดลวด

2.4 **<u>การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง</u>**

ทำการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดด้วยพายโลหะบนแผ่นแก้วให้มีเนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 40 วินาที นำวัสดุใส่ลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 มิลลิเมตร สูง 2.0 มิลลิเมตร วัดค่าความเป็นกรด-ด่างด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH-Meter) รุ่น 420A (ORION, Boston, USA) ทุก 2 นาที จนครบ 60 นาทีหลังผสม (ความละเอียดความเป็นกรด-ด่าง 0.01) ทำการทดสอบ 5 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 1 (เอ็มทีเอ ซึ่งใช้เป็นกลุ่มควบคุม) และ 10 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 2 และ 3 วิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภาพที่ 6 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง

2.5 การศึกษาหาปริมาณโลหะหนัก (สารหนู ตะกั่ว และแคดเมียม)

ดำเนินการทดสอบประยุกต์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 9917-1 (2007) โดยอุปกรณ์เครื่องแก้วและพลาสติกทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองจะนำมาทำความสะอาดโดยการล้างด้วยน้ำสะอาดและแช่ในสารละลายกรดไนตริก (ชนิดสำหรับการวิเคราะห์ซึ่งจะมีการปะปนของโลหะหนักในปริมาณต่ำ) (LAB-SCAN, Bangkok, Thailand) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นสะอาดปราศจากอิออนระดับ 2 (grade 2 water) ตามมาตรฐานไอเอสโอ 3696 (1987) 2 ครั้งก่อนเริ่มทำการทดลอง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนัก

ผสมวัสดุในแต่ละกลุ่มปริมาณ 3.00 กรัมตามอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่กำหนดด้วยพายพลาสติกบนแผ่นแก้วให้วัสดุมีเนื้อเนียนเข้ากันภายในเวลา 60 วินาที นำวัสดุที่ผสมแล้วใส่ในถุงพลาสติกแห้งสะอาด ปิดปากถุงและใช้นิ้วมือกดรีดวัสดุดังกล่าวให้เป็นแผ่นบาง เก็บถุงพลาสติกที่มีชิ้นงานไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำแผ่นวัสดุที่แข็งตัวแล้วมาทำการบดด้วยครกและโกร่งบดยาให้ได้ผงละเอียด ชั่งน้ำหนักผงหลังการบดด้วยเครื่องชั่งอิเลกทรอนิกส์ระบบดิจิตอล (ความละเอียดทศนิยม 5 ตำแหน่ง) ให้ได้ 2.00 ± 0.01 กรัม

เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยเจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นสำหรับงานวิเคราะห์ (analytical grade) (MERK SA, Rio de Janeiro, Brazil.) จำนวน 20 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นสะอาดปราศจากอิออนระดับ 2 จำนวน 80 มิลลิลิตร แบ่งสารละลายกรดไฮโดรคลอริกปริมาณ 50 มิลลิลิตร เทลงในขวดแก้วรูปกรวย ตามด้วยส่วนผงของวัสดุหนัก 2.00 กรัม ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากันเป็นเวลา 1 นาที ตั้งขวดแก้วและสารละลายดังกล่าวทิ้งไว้เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

เทสารละลายใสลงในหลอดพลาสติก นำไปเข้าเครื่องเซนตริฟิวจ์ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ให้ตะกอนตกลงสู่ก้นหลอด ดูดสารละลายใสเก็บใส่ภาชนะเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักต่อไป ทั้งนี้การวิเคราะห์หาโลหะหนัก (สารหนู สารตะกั่ว และแคดเมียม) จะดำเนินการวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงแบบอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน (atomic absorption) นำปริมาณโลหะหนักในสารละลายที่วิเคราะห์ได้ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรมาคำนวณกลับเป็นปริมาณโลหะหนักในวัสดุในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือส่วนในล้านส่วน (ppm: part per million) ทั้งนี้จะทำการวิเคราะห์หาโลหะหนักในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพื่อใช้เป็นกลุ่มควบคุมย่อยในแต่ละวัสดุ ทำการทดสอบ 1 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 1 (เอ็มทีเอซึ่งใช้เป็นกลุ่มควบคุม) และ 3 ตัวอย่างสำหรับวัสดุในกลุ่มที่ 2 และ 3 โดยจะทำการวัดผลซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับข้อกำหนด และมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนัก ในวัสดุทางทันตกรรม

2.6 <u>การศึกษาขนาดอนุภาค</u>

นำส่วนผงของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมาทำการแขวนลอยในสารละลายเอทานอล หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (laser particle size distribution analyzer (Malven Instrument Ltd. Malvern, UK.)) นำผลที่ได้มาทำการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคและจำแนกปริมาณของขนาดอนุภาค 5 ช่วงชั้น ได้แก่

- อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1.00 ไมโครเมตร
- อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 1.01 ถึง 10.00 ไมโครเมตร
- อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 10.01 ถึง 20.00 ไมโครเมตร
- อนุภาคที่มีขนาดระหว่าง 20.01 ถึง 30.00 ไมโครเมตร
- อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 30.00 ไมโครเมตร

ทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างในทุกกลุ่มการทดลอง และทำการวัดผลซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.7 <u>การศึกษาส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ</u>

นำส่วนผงที่ยังไม่ได้ผสมของเหลวและส่วนผงที่ได้จากการบดวัสดุที่แข็งตัวแล้วเป็นเวลา 1 วันของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมไปวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณในรูปธาตุ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูโอ-เรสเซนส์ สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray fluorescence spectrometer) (EDS; ISIS300-6647, Oxford Instruments, Wycombe Bucks, UK.) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscpoe) JEOL *JSM* 5410 LV SEM (JEOL Ltd., Tokyo, Japan) และวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพในรูปสารประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) (Phillips PW3040) โดยในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณจะทำการทดสอบ 3 ตัวอย่างในทุกกลุ่มการทดลอง ส่วนการวิเคราะห์เชิงคุณภาพจะทำการทดสอบ 1 ตัวอย่างในทุกกลุ่มการทดลอง

จำนวนประชากรในการศึกษาตอนที่ 2

จำนวนตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะประยุกต์ตามมาตรฐานที่ระบุไว้ โดยในกรณีที่หัวข้อการศึกษามีการกำหนดมาตรฐานรองรับจะทำการเพิ่มจำนวนตัวอย่างอีกอย่างน้อย 1 เท่าจากที่ระบุไว้ในมาตรฐานสำหรับการทดสอบพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม และเท่าที่ระบุไว้ในมาตรฐานสำหรับการทดสอบเอ็มทีเอ

ทั้งนี้จะดำเนินการทดสอบโดยมีจำนวนตัวอย่างในแต่ละการศึกษา สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2 สรุปจำนวนตัวอย่างที่จะดำเนินการทดสอบในแต่ละหัวข้อการศึกษา

การศึกษา	**จำนวนตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 เอ็มทีเอ**	**จำนวนตัวอย่างในกลุ่มที่ 2 พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา**	**จำนวนตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม**
1. เวลาแข็งตัว	5	10	10
2. ความทนแรงอัด	5	10	10
3.อุณหภูมิขณะแข็งตัว	5	10	10
4. ความเป็นกรด-ด่าง	5	10	10
5. ปริมาณโลหะหนัก	1 (วัด 3 ครั้ง)	3 (วัด 3 ครั้ง)	3 (วัด 3 ครั้ง)
6. ขนาดอนุภาค	3 (วัด 3 ครั้ง)	3 (วัด 3 ครั้ง)	3 (วัด 3 ครั้ง)
7.ส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณ (ในรูปธาตุ)	3	3	3
8.ส่วนประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพ (ในรูปสารประกอบ)	1	1	1

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS 17.0 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเวลาแข็งตัว ความทนแรงอัด อุณหภูมิขณะแข็งตัวที่นาทีที่ 2 30 และ 60 ความเป็นกรดด่างที่นาทีที่ 2 30 และ 60 และการกระจายตัวของอนุภาค โดยทำการทดสอบการกระจายตัว กรณีมีการกระจายตัวแบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปกติ พิจารณาใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม ด้วย บอนเฟอโรนี กรณีข้อมูลมีความแปรปรวนเท่ากัน หรือใช้แทมเฮน กรณีข้อมูลมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ในกรณีที่ข้อมูลมีการกระจายตัวไม่ปกติพิจารณาใช้ครูสคัลวาลิส โดยดำเนินการทดสอบสถิติทั้งหมดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้สำหรับข้อมูลในหัวข้อปริมาณสารหนู สารตะกั่ว แคดเมียม และองค์ประกอบของธาตุ พิจารณาใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics)ร่วมกับการเปรียบเทียบกับมาตรฐานข้อกำหนดทางทันตกรรมสำหรับปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ (ไอเอสโอ 9917-1:2007)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการศึกษาเปรียบเทียบและผลการวิเคราะห์

ตอนที่ 1 : การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมสารพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

1.1 <u>การศึกษาเวลาแข็งตัว</u>

ผลการศึกษาพบว่าในทุกกลุ่มการทดลอง (กลุ่มที่ 4 ถึงกลุ่มที่ 15) สามารถลดเวลาแข็งตัวลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม (กลุ่มที่ 5 6 8 9 11 และ 12 ($p \leq 0.005$) กลุ่มที่ 4 7 10 14 และ 15 ($p \leq 0.01$) และกลุ่มที่ 13 ($p < 0.05$)) โดยเวลาแข็งตัวในกลุ่มการทดลองอยู่ในช่วง 4.20 ± 0.38 ถึง 11.27 ± 0.19 นาที เปรียบเทียบกับเวลาแข็งตัวในกลุ่มควบคุมซึ่งอยู่ในช่วง 26.03 ± 2.44 ถึง 54.83 ± 2.50 นาที ดังรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยเวลาแข็งตัวของวัสดุแต่ละชนิดจากการศึกษาตอนที่ 1

วัสดุ	เวลาแข็งตัว (ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) (นาที)		
	L/P = 0.33	L/P = 0.30	L/P = 0.27
OWPC (control)	54.83 ± 2.50	49.13 ± 1.75	26.03 ± 2.44
AWPC + dH_2O	8.50 ± 0.20**	5.50 ± 0.31*	4.20 ± 0.38*
AWPC + 1.2% PC	9.17 ± 0.24**	6.00 ± 0.17*	5.57 ± 0.09*
AWPC + 1.8% PC	9.8 ± 0.36**	7.07 ± 0.51*	6.17 ± 0.20*
AWPC + 2.4% PC	11.27 ± 0.19***	7.87 ± 0.22**	6.40 ± 0.15**

OWPC: Ordinary White Portland cement หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 หรือพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC: Accelerated White Portland cement หมายถึง พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

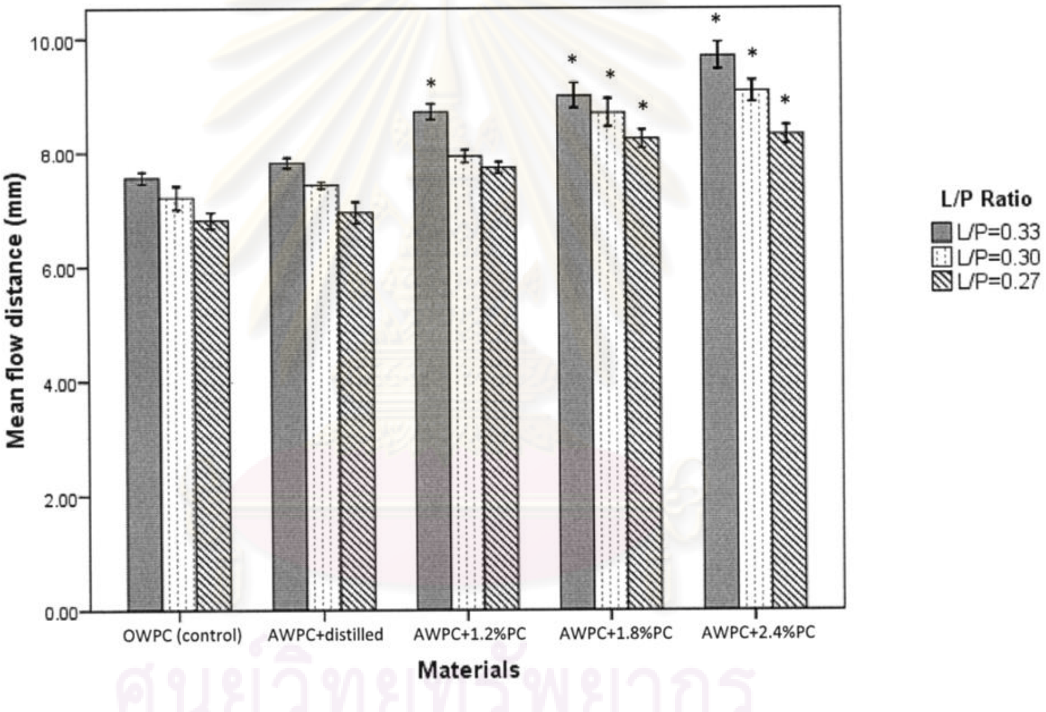
PC: Polycarboxylate superplasticizer หมายถึง สารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติ-ไซเซอร์ (%ร้อยละโดยปริมาตร)

L/P: Liquid to powder ratios หมายถึง อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์

* หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม ($p \leq 0.005$)
** หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม ($p \leq 0.01$)
*** หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม ($p<0.05$)

1.2 <u>การศึกษาคุณสมบัติการไหลแผ่</u>

ผลการศึกษาพบว่า ค่าเฉลี่ยการไหลแผ่ในกลุ่มที่ 7 และกลุ่มที่ 10 ถึง 15 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม ($p<0.001$) ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟการไหลแผ่ของวัสดุชนิดต่าง ๆ (* หมายถึงแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม ($p<0.001$))
OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา
AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

วัสดุที่มีศักยภาพในการนำไปพัฒนาต่อเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงควรมีเวลาแข็งตัวที่ไม่นานเกินไป เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และสามารถทำการบูรณะถาวรต่อได้ภายในครั้งเดียวกันกับที่ใส่วัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง โดยวัสดุในทุกกลุ่มการทดลอง(กลุ่มที่ 4

ถึงกลุ่มที่ 15) สามารถลดเวลาแข็งตัวลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมทั้ง 3 กลุ่ม ($p<0.05$)

หากพิจารณาประกอบกับคุณสมบัติการไหล่แผ่พบว่าวัสดุใน 7 กลุ่มการทดลอง ได้แก่วัสดุในกลุ่มที่ 7 และกลุ่มที่ 10 ถึง 15 มีคุณสมบัติการไหลแผ่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) อย่างไรก็ตามวัสดุในกลุ่มที่ 7 10 และ 13 มีเวลาแข็งตัวที่ยาวนานและอาจไม่สะดวกต่อการใช้งานทางคลินิก (9.17 ± 0.24 นาที 9.8 ± 0.36 นาที และ11.27 ± 0.19 นาที ตามลำดับ) ทั้งนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติการไหลแผ่ระหว่างวัสดุกลุ่มที่ 11 กับกลุ่มที่ 12 กลุ่มที่ 11 กับกลุ่มที่ 14 และกลุ่มที่ 11 กับกลุ่มที่ 15 พบว่าวัสดุกลุ่มที่ 11 มีคุณสมบัติการไหลแผ่ดีกว่าวัสดุในกลุ่มที่ 12 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.005$) การเปรียบเทียบคุณสมบัติการไหลแผ่ระหว่างวัสดุกลุ่มที่ 11 กับกลุ่มที่ 14 และกลุ่มที่ 11 กับกลุ่มที่ 15 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่ม ($p=0.069$ และ 0.056 ตามลำดับ) ดังนั้นวัสดุในกลุ่มที่ 11 ซึ่งมีการไหลแผ่ที่ดีกว่าวัสดุในกลุ่มที่ 12 แต่ไม่แตกต่างจากวัสดุในกลุ่มที่ 14 และ 15 และมีความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ในการผสมน้อยกว่า จึงเป็นกลุ่มที่นำไปใช้ทดสอบต่อในตอนที่ 2

สรุปผลตอนที่ 1

การศึกษาในตอนที่ 1 เพื่อพิจารณาหาความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่เหมาะสมพบว่า พอร์ตแลนด์-ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ร้อยละ 1.8 โดยปริมาตรด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.30 โดยน้ำหนักสามารถลดเวลาแข็งตัวและเพิ่มคุณสมบัติการไหลแผ่ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติผสมน้ำกลั่น นอกจากนี้ความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ และอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ดังกล่าวสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้มีเวลาการแข็งตัวอยู่ในช่วงที่สามารถนำมาทำเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงได้

ตอนที่ 2 : การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ

การศึกษาตอนที่ 2 นี้แสดงผลการศึกษาเปรียบเทียบสารพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลายและอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์จากการศึกษาในตอนที่ 1 เปรียบเทียบกับคุณสมบัติต่าง ๆ ของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้งานทางคลินิกอยู่ในปัจจุบัน

2.1 **การศึกษาเวลาแข็งตัว**

ผลการศึกษาพบว่าไวท์โปรรูท เอ็มทีเอผสมน้ำกลั่นมีเวลาแข็งตัวเฉลี่ย 81.53 ± 3.35 นาที พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมน้ำกลั่นมีเวลาแข็งตัวเฉลี่ย 49.28 ± 2.06 นาที ในขณะที่พอร์ต-แลนต์เมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ มีเวลาแข็งตัว 7.03 ± 0.44 นาที โดยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์มีเวลาแข็งตัวน้อยกว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.001) ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยเวลาแข็งตัวของวัสดุแต่ละชนิดจากการศึกษาตอนที่ 2

กลุ่มการทดลอง	เวลาแข็งตัว (Mean ± S.D.) (นาที)
MTA ผสมน้ำกลั่น (L/P = 0.33)	81.53 ± 3.35[(a)]
OWPC ผสมน้ำกลั่น (L/P = 0.30)	49.28 ± 2.06[(b)]
AWPC ผสมสารละลาย 1.8% PC (L/P = 0.30)	7.03 ± 0.44[(c)]

ตัวอักษร a, b และ c ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.001)

OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

2.2 **การศึกษาความทนแรงอัด**

ผลการศึกษาพบว่าในวัสดุทุกชนิด มีความทนแรงอัดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น โดยการทดสอบความทนแรงอัดในวันที่ 1 พบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ มีความทนแรงอัดมากที่สุด (58.49 ± 5.80 เมกะปาสกาล) ขณะที่ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่นมีความทนแรงอัดน้อยที่สุด (49.21 ± 4.94 เมกะปาสคาล) เมื่อทำการทดสอบความทนแรงอัดในวันที่ 21 กลับพบว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่นมีความทนแรงอัดมากที่สุดในกลุ่มการทดลองทั้งหมด ทั้งนี้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์มีความทนแรงอัดไม่แตกต่างจากไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ทั้งการทดสอบความทนแรงอัดในวันที่ 1 และวันที่ 21 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 5 และภาคผนวก

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยความทนแรงอัดวันที่ 1 และวันที่ 21 ของวัสดุแต่ละชนิด

กลุ่มการทดลอง	ความทนแรงอัด(Mean ± S.D.)(เมกะปาสกาล)	
	1 วัน	21 วัน
MTA ผสมน้ำกลั่น (L/P = 0.33)	49.21 ± 4.94(a)	95.77 ± 3.72(a*)
OWPC ผสมน้ำกลั่น (L/P = 0.30)	52.14 ± 7.83(a)	77.75 ± 4.09(b*)
AWPC ผสมสารละลาย 1.8% PC (L/P = 0.30)	58.49 ± 5.80(a)	87.52 ± 8.75(a)

*ตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย a*แตกต่างจาก b* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$); a แตกต่างจาก b* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.021$); a ไม่แตกต่างจาก a* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)*

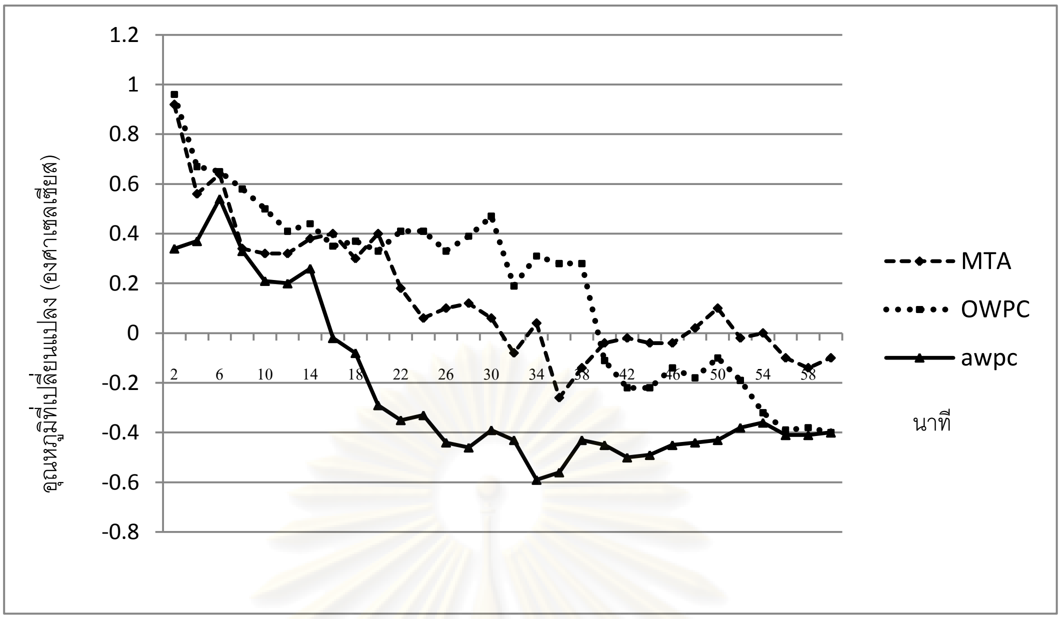
OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

2.3 <u>การศึกษาอุณหภูมิขณะแข็งตัว</u>

ผลการศึกษาพบว่าในทุกกลุ่มการทดลอง เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะซีเมนต์แข็งตัว โดยช่วงแรกในการดำเนินของปฏิกิริยา วัสดุจะมีการคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัสดุในนาทีที่ 2 เปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้น 0.34 ถึง 0.96 องศาเซลเซียส เมื่อปฏิกิริยาของซีเมนต์ดำเนินไป วัสดุจะเริ่มมีการคายความร้อนลดลง และมีการลดลงของอุณหภูมิวัสดุในช่วงเวลา 32 นาที 40 นาที และ 16 นาทีภายหลังการผสมของไวท์โปรรูทเอมทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีภายหลังการผสมซีเมนต์ อุณหภูมิของวัสดุมีการลดลง 0.1 ถึง 0.4 องศาเซลเซียส ดังแสดงรายละเอียดในภาพที่ 8 และภาคผนวก

ทั้งนี้หากเปรียบเทียบตามช่วงเวลาขณะมีการดำเนินไปของปฏิกิริยา ในนาทีที่ 2 และ 30 ภายหลังการผสมส่วนผงเข้ากับส่วนของเหลว ไวท์โปรรูทเอมทีเอ และ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมากกว่า พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *($p<0.05$)* เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีการลดลงของอุณหภูมิมากกว่า ไวท์โปรรูทเอมทีเอ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *($p<0.05$)*



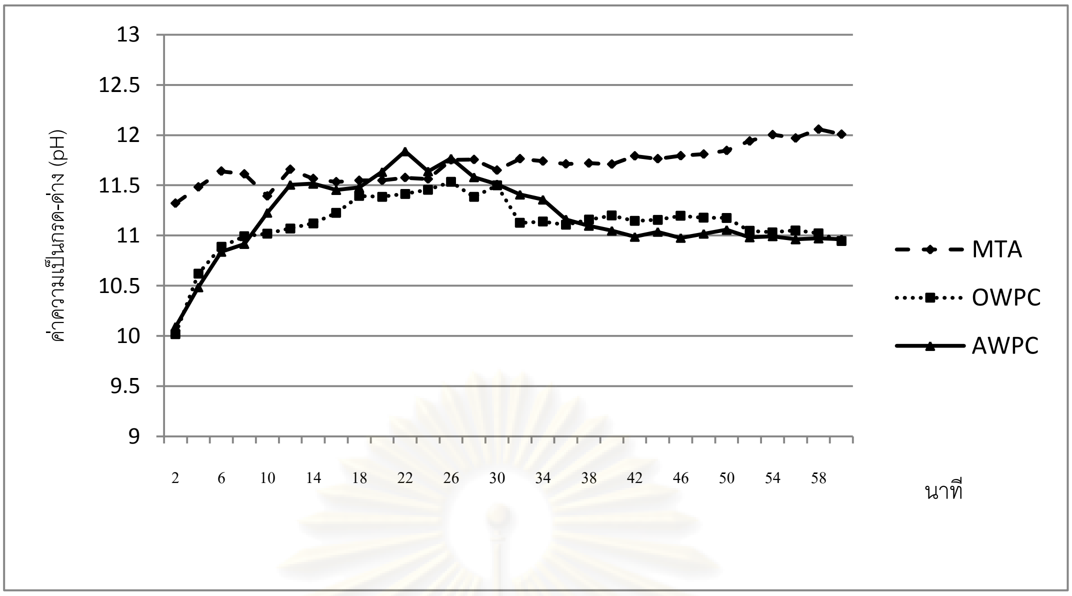
ภาพที่ 8 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุชนิดต่าง ๆ ขณะแข็งตัว

OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

2.4 **การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างขณะแข็งตัว**

ผลการศึกษาพบว่าในทุกกลุ่มการทดลอง มีความเป็นด่างทันทีภายหลังการผสมส่วนผงเข้ากับส่วนที่เป็นของเหลว และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยในนาทีที่ 2 ภายหลังการผสมไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 11.32 มากกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (10.02) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม (10.09) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *($p<0.05$)* โดยเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นในช่วง 60 นาทีภายหลังการผสม ค่าความเป็นกรด-ด่างของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปในช่วง 60 นาทีภายหลังการผสม โดยไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีค่าความเป็นกรด-ด่าง 12.01 มากกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (10.95) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม (10.96) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ *($p<0.05$)* ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาคผนวก



***ภาพที่** 9* ค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุชนิดต่าง ๆ ขณะแข็งตัว

OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

2.5 <u>การศึกษาปริมาณโลหะหนัก</u>

ผลการศึกษาพบว่ามีปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ และสารละลายควบคุมดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 6 และ ภาคผนวก โดยไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีปริมาณสารหนูน้อยกว่าข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนักในวัสดุทางทันตกรรมซึ่งกำหนดให้มีสารหนูได้ไม่เกิน 2 ส่วนในล้านส่วน ขณะที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดามีปริมาณสารหนูเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด สำหรับสารตะกั่ววัสดุทุกกลุ่มมีปริมาณสารตะกั่วน้อยกว่าปริมาณในข้อกำหนดมาตรฐานซึ่งกำหนดให้มีสารตะกั่วได้ไม่เกิน 100 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วน สำหรับสารแคดเมียม มีการตรวจพบในปริมาณที่น้อยที่สุดในบรรดาโลหะหนักที่ทำการตรวจ ซึ่งมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนักในวัสดุทางทันตกรรมยังไม่มีข้อกำหนดสำหรับโลหะหนักดังกล่าว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 ปริมาณโลหะหนักในวัสดุแต่ละชนิด (ส่วนในล้านส่วน)

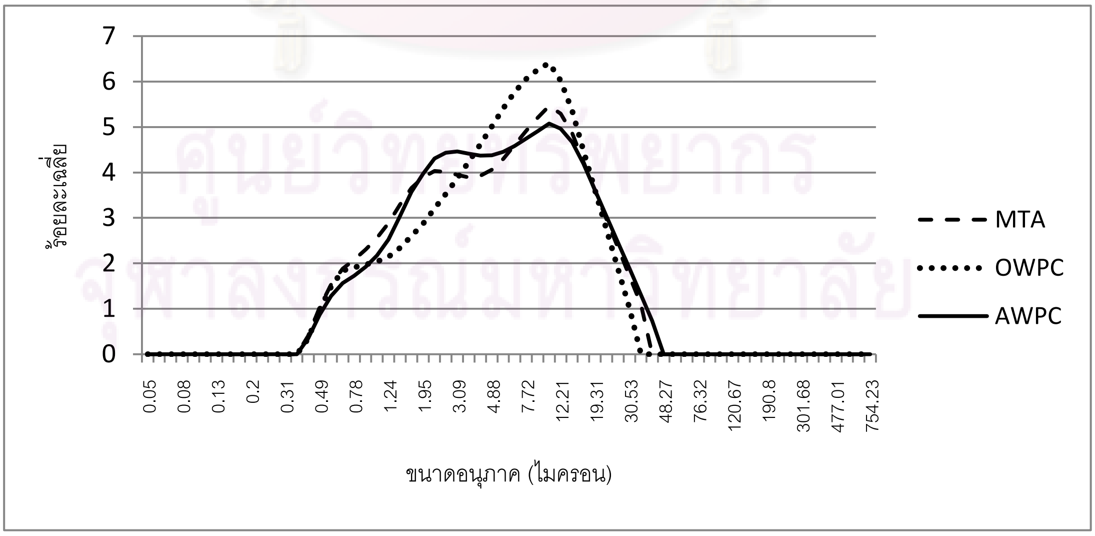
	ปริมาณโลหะนักในซีเมนต์ (ส่วนในล้านส่วน) ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	MTA	OWPC	AWPC	Control
สารหนู (As)	0.500	3.000 ± 0.430	0.667 ± 0.144	< 0.250
สารตะกั่ว (Pb)	< 0.250	3.500 ± 0.661	< 0.250 ± 0.000	< 0.250
สารแคดเมียม (Cd)	< 0.025	0.367 ± 0.063	0.050 ± 0.000	< 0.025

OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

2.6 <u>**การศึกษาขนาดของอนุภาค**</u>

จากการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดย ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 8.67 ไมโครเมตร 8.49 ไมโครเมตร และ 9.10 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดระหว่าง 1.01 ถึง 10 ไมโครเมตร และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของร้อยละเฉลี่ยของอนุภาคภายในช่วงชั้นดัง แสดงรายละเอียดในตารางที่ 7 และภาคผนวก ขนาดของอนุภาคที่ศึกษามีการกระจายที่คล้ายคลึงกันในทุกกลุ่มการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การกระจายของอนุภาคแยกตามขนาดของวัสดุแต่ละชนิด

OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

ตารางที่ 7 ร้อยละเฉลี่ยการกระจายของอนุภาคแยกตามขนาดของวัสดุแต่ละชนิด

ขนาด (µm)	**ร้อยละเฉลี่ยของอนุภาค ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน**		
	MTA	OWPC	AWPC
< 1 µm	10.78 ± 0.01 %	9.74 ± 0.01 %	9.02 ± 0.13 %
1.01-10 µm	61.34 ± 0.03 %	63.06 ± 0.27 %	62.47 ± 0.11 %
10.01-20 µm	20.44 ± 0.06 %	21.25 ± 0.19 %	19.72 ± 0.03 %
20.01-30 µm	6.18 ± 0.05 %	4.83 ± 0.42 %	6.53 ± 0.01 %
>30 µm	1.29 ± 0.03 %	1.12 ± 0.02 %	2.27 ± 0.04 %
Mean (µm)	8.67 ± 0.02 µm	8.49 ± 0.06 µm	9.10 ± 0.02 µm
Median (µm)	5.82 ± 0.00 µm	6.56 ± 0.00 µm	5.82 ±0.01 µm

OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

2.7 <u>การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ</u>

ผลการศึกษาพบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของส่วนผงของซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิดได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) แคลเซียม (Ca) และซิลิกา (Si) มีจำนวนร้อยละที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 8) ทั้งนี้มีการตรวจพบ บิสมัท (Bi) โปแทสเซียม (K) และโซเดียม (Na) (โปแทสเซียมและโซเดียมตรวจพบในปริมาณน้อยมาก) ในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ ขณะที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมตรวจไม่พบสารดังกล่าว ทั้งนี้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาเป็นสารเพียงชนิดเดียวที่ตรวจพบซัลเฟอร์ (S) ร้อยละ 0.45 ในส่วนผง และร้อยละ 0.54 ในซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว

เมื่อทำการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณในซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วพบว่าซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิดสามารถตรวจสอบพบธาตุที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O) แคลเซียม (Ca) และซิลิกา (Si) ขณะที่ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอตรวจพบ บิสมัท (Bi) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาตรวจพบซัลเฟอร์ (S) ส่วนซีเมนต์อื่นไม่พบธาตุดังกล่าว รายละเอียดอื่นดังแสดงในตารางที่ 8 และภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 ร้อยละเฉลี่ยของปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุแต่ละชนิด(ร้อยละ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

	MTA		OWPC		AWPC	
	Powder	Set	Powder	Set	Powder	Set
C	25.68 ± 3.08	22.54 ± 1.48	16.99 ± 4.30	24.33 ± 4.77	17.80 ± 2.41	24.23 ± 4.61
O	33.96 ± 1.42	48.55 ± 1.88	38.17 ± 6.11	52.68 ± 1.61	41.70 ± 1.02	51.79 ± 5.25
Al	0.72 ± 0.10	0.50 ± 0.04	0.68 ± 0.21	1.01 ± 0.08	1.11 ± 0.34	1.05 ± 0.18
Si	4.00 ± 0.40	3.72 ± 0.28	3.37 ± 1.46	4.28 ± 0.23	4.47 ± 1.51	4.14 ± 0.81
K	0.06 ± 0.11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ca	18.75 ± 3.42	16.04 ± 0.64	38.39 ± 9.40	19.49 ± 2.01	32.47 ± 3.33	18.79 ± 4.56
Cu	0.81 ± 0.05	0.18 ± 0.32	1.21 ± 1.14	N/A	1.47 ± 1.28	N/A
Bi	15.69 ± 2.58	8.48 ± 0.24	N/A	N/A	N/A	N/A
Zn	0.25 ± 0.43	N/A	0.76 ± 1.31	N/A	0.89 ± 0.98	N/A
Na	0.09 ± 0.16	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
S	N/A	N/A	0.45 ± 0.15	0.54 ± 0.04	N/A	N/A
Mg	N/A	N/A	N/A	N/A	0.09 ± 0.15	N/A

N/A : ไม่สามารถตรวจพบ

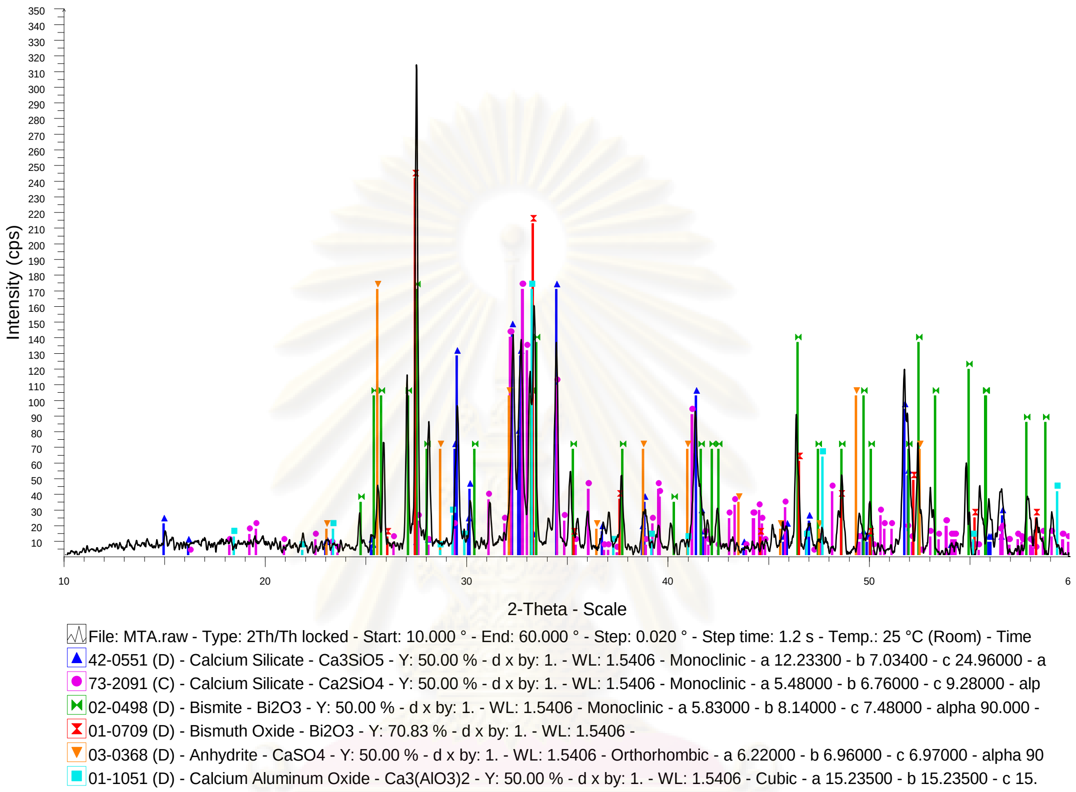
OWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

AWPC หมายถึงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

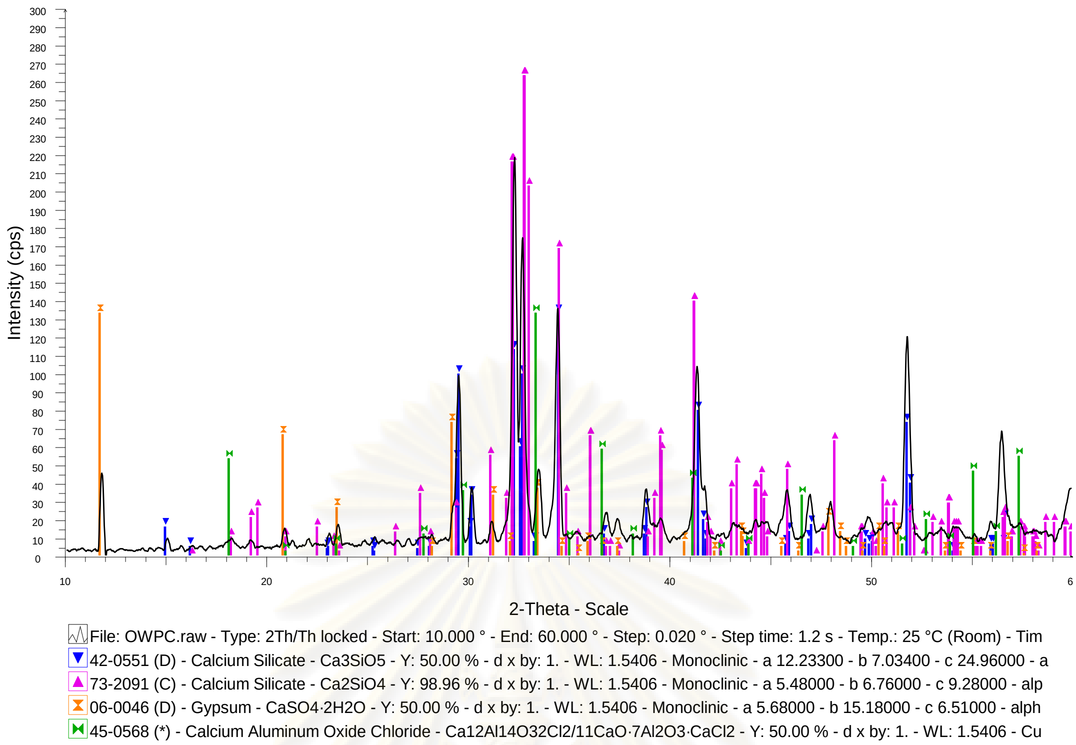
เมื่อทำการตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพในรูปสารประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าส่วนประกอบหลักของวัสดุทั้ง 3 ชนิดได้แก่ไตร-แคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยส่วนผงของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอประกอบด้วย ไตร-แคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต บิสมัทออกไซด์ บิสไมต์ แอนไฮไดรด์แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนผงของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาประกอบด้วยไตรแคลเซียมซิ-ลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ยิปซัม และแคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์ ส่วนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอลูมิเนียม-ออกไซด์ และเป็นวัสดุกลุ่มเดียวที่ตรวจไม่พบสารประกอบในกลุ่มแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม เมื่อ

ตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพในรูปสารประกอบในซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว พบว่า องค์ประกอบทางเคมีในสารดังกล่าวมีความสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีในส่วนผง แต่พบแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเติมในซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วทั้ง 3 ชนิด

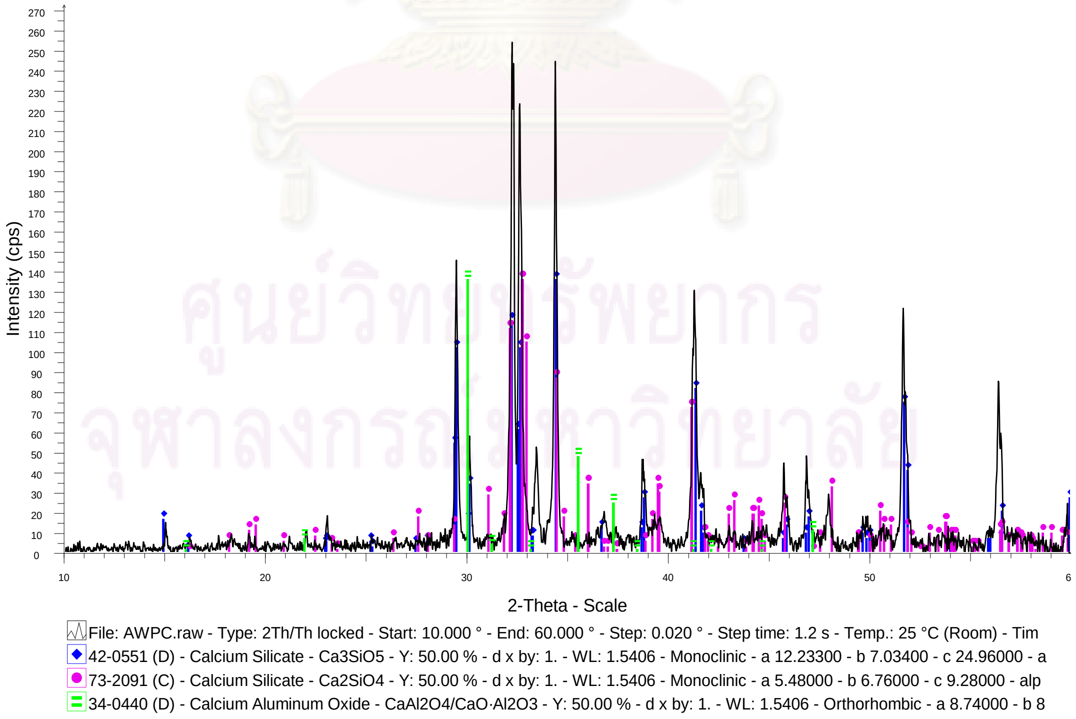


ภาพที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ

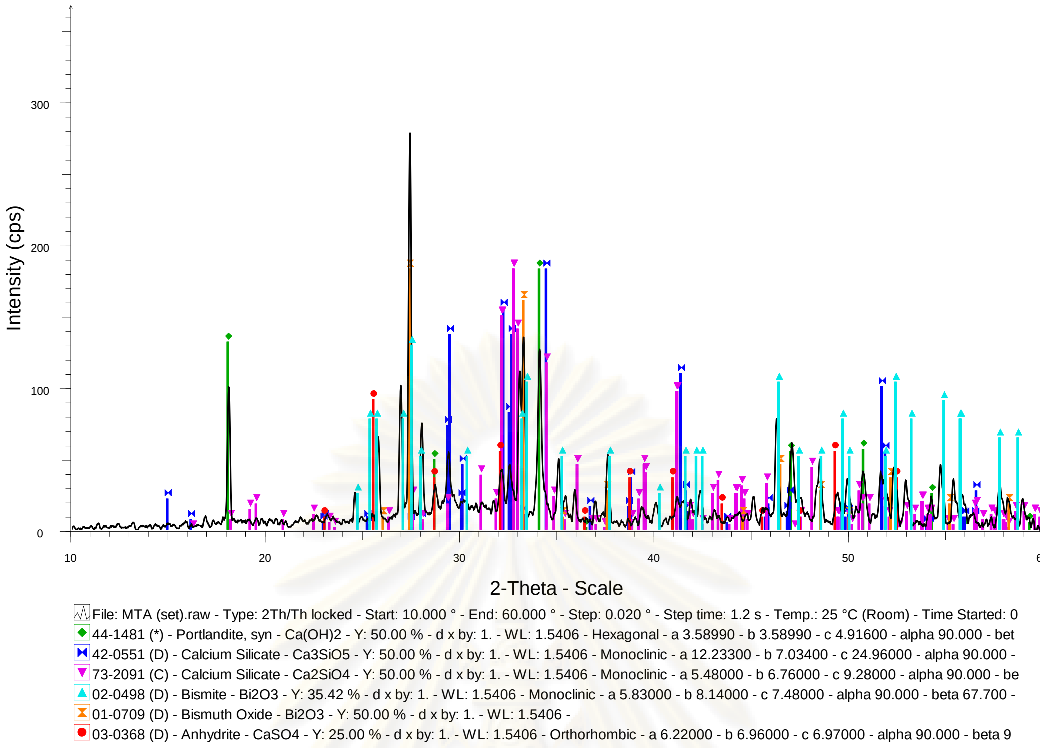
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



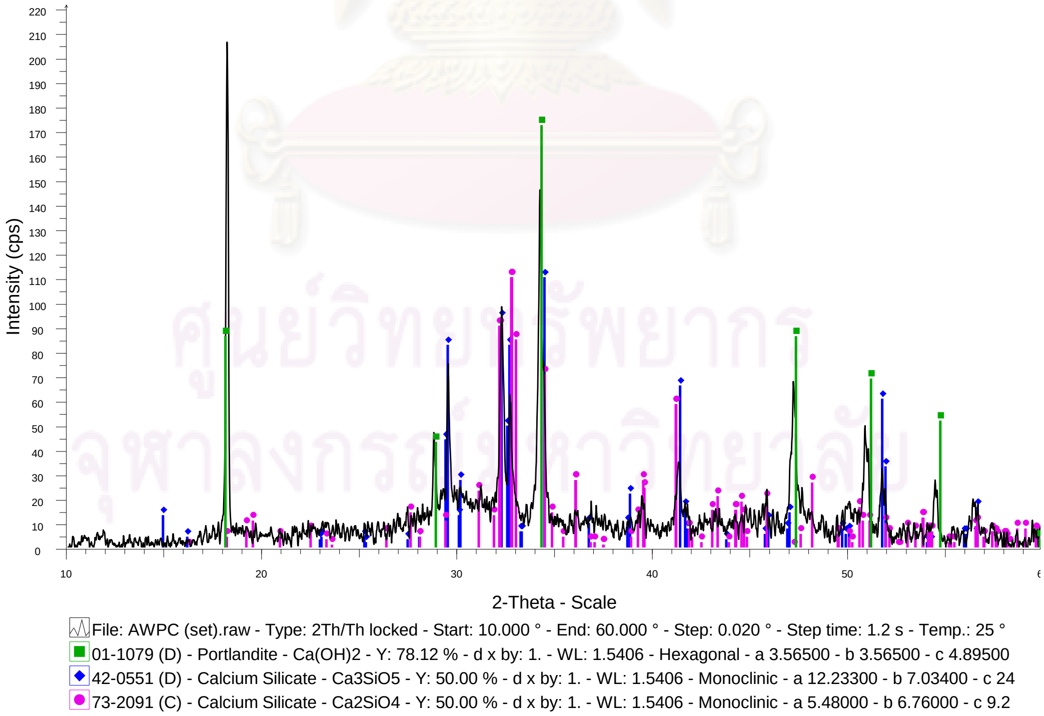
ภาพที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา



ภาพที่ 13 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

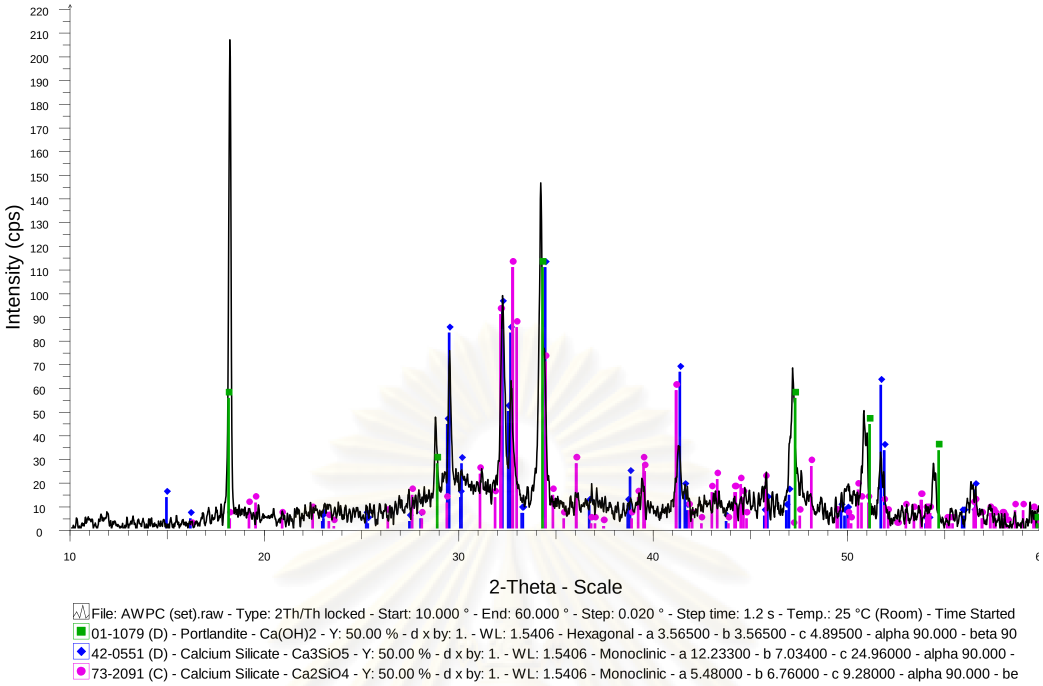


ภาพที่ 14 องค์ประกอบทางเคมีของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอผสมน้ำกลั่น



ภาพที่ 15 องค์ประกอบทางเคมีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



***ภาพที่** 16* องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผงพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมน้ำกลั่น

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายผลการวิจัย

เมื่อพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ สารประกอบที่มีกลุ่มซัลเฟตและสารประกอบยิปซัมในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะเริ่มละลาย ทำให้เกิดสภาพสารละลายที่มีซัลเฟตไอออนเข้มข้นล้อมรอบอนุภาคเม็ดปูน เมื่อเริ่มทำการผสม ไตรแคลเซียมอลูมิเนตในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเกิดโครงสร้างอลูมิเนตเจล เรียงตัวเป็นชั้นของไฮโดรแคลูไมท์-ดับเบิ้ลไฮดรอกไซด์ (hydrocalumite type layered double hydroxides) ก่อนเปลี่ยนแปลงเป็นเอททริงไกต์ (ettringite) เอททริงไกต์จะค่อย ๆ เปลี่ยนสภาพไปเป็นสารประกอบโมโนซัลเฟตซึ่งมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน ปฏิกิริยาดังกล่าวมีผลต่อการเกิดการแข็งตัวในระยะแรก ขณะที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของส่วนประกอบหลัก ได้แก่ไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาต่อจากนั้น โดยอนุภาคน้ำที่อยู่ระหว่างแผ่นเจลและอนุภาคน้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลารีของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่กำลังแข็งตัว จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตเกิดได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกมีความรุนแรงค่อนข้างมาก จึงมีการใส่สารยิปซัมในปูน เพื่อให้หมู่ซัลเฟตหน่วงปฏิกิริยาระหว่างชั้นดับเบิ้ลไฮดรอกไซด์และค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่นอย่างค่อยเป็นค่อยไป การนำยิปซัมออกแม้จะทำให้เกิดการแข็งตัวของวัสดุอย่างรวดเร็ว แต่สามารถป้องกันได้โดยการใช้สารประกอบอื่นที่มีประจุลบ เช่นโพลีคาร์บอกซีเลต-ซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์เข้าไปหน่วงปฏิกิริยาระหว่างชั้นดับเบิ้ลไฮดรอกไซด์ ในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการทำงานของหมู่ซัลเฟตในยิปซัม อย่างไรก็ตามเนื่องจากยังไม่มีการศึกษาถึงปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ ที่สามารถหน่วงปฏิกิริยาได้ใกล้เคียงกับความต้องการเพื่อนำมาใช้งานในทางทันตกรรม การทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์จึงมีความจำเป็นก่อนการพัฒนาและนำไปทดสอบคุณสมบัติในด้านอื่น ๆ

นอกจากโพลีคาร์บอกซีเลตจะมีผลในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตแล้วยังมีความสามารถในการลดแรงตึงผิวของน้ำ และช่วยผลักอนุภาคของเม็ดปูนออกจากกันทำให้การผสมทำได้ง่ายขึ้น น้ำสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดปูนได้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นและเหลือเม็ดปูนที่เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ในซีเมนต์น้อยลง โพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์จึงทำหน้าที่เสมือนสารลดน้ำในการผสม อัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์จึงเป็นอีกปัจจัยที่ควรพิจารณาก่อนการพัฒนาวัสดุดังกล่าวเพื่อใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนของความเข้มข้นของโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ และปริมาณสารละลายที่เหมาะสมในการผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม (การศึกษาตอนที่ 1) พบว่า การผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1.8 โดยปริมาตรด้วยอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ 0.30 โดยน้ำหนัก สามารถลดเวลาการแข็งตัวและปรับปรุงคุณสมบัติการไหลแผ่ รวมถึงคุณสมบัติการใช้งานให้เหมาะสมสำหรับนำไปพัฒนาต่อเป็นสารปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงได้ ถึงแม้ว่าโพลีคาร์บอกซีเลตจะค่อนข้างมีความปลอดภัยในการใช้เป็นส่วนหนึ่งของเวชภัณฑ์ เนื่องจากมีการนำสารดังกล่าวมาใช้เป็นกระสายยาในยาหยอดตา[100] รวมถึงการใช้โพลีเมอร์ดังกล่าวในการส่งถ่ายสารพันธุกรรมเข้าสู่นิวเคลียสในงานวิจัยและการรักษาในระดับสารพันธุกรรม (gene therapy)[101] และใช้โพลี-คาร์บอกซีเลตซีเมนต์ในการปิดแผลเนื้อเยื่อใน[102] แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นต่อความเป็นพิษของเซลล์หรือการตอบสนองของเซลล์เนื้อเยื่อใน ดังนั้นการพัฒนาสารปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงและคงสภาพความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในจึงควรพิจารณา เลือกผสมสารละลายโพลีคาร์-บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ด้วยความเข้มข้นน้อยที่สุดที่สามารถลดเวลาการแข็งตัวและเพิ่มการไหลแผ่ของวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

จากผลการทดสอบในเรื่องของเวลาการแข็งตัวและคุณสมบัติการไหลแผ่ สรุปได้ว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เมื่อผสมด้วยสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์-พลาสติไซเซอร์มีคุณสมบัติเบื้องต้นเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีเวลาการแข็งตัวน้อยลง มีคุณสมบัติการไหลแผ่และมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวชนิดที่ 1 (พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา) ผสมน้ำกลั่น จึงสามารถทำการบูรณะฟันถาวรได้ภายในการนัดหมายครั้งเดียว อย่างไรก็ตามการผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ลงไปในวัสดุ อาจมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีภายหลังปฏิกิริยาก่อตัวสิ้นสุด จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบต่อในตอนที่ 2 โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ และองค์ประกอบทางเคมีกับไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในคลินิกและถือเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงในปัจจุบัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม กับไวท์โปรรูทเอ็มที-เอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา พบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมเมื่อนำมาผสมโพลี-คาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์สามารถลดเวลาการแข็งตัวลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบส่วนประกอบของแอนไฮไดรด์แคลเซียมซัลเฟตในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และยิปซัมในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญในการ

ยืดระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุ นอกจากนี้การผสมบิสมัท[16] และการใช้ของเหลวในการผสมมากกว่ากลุ่มพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาและกลุ่มพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม อาจเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาการแข็งตัวของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอยาวนานมากที่สุด

การลดน้ำในการผสมร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาการแข็งตัวที่รวดเร็วอาจมีผลทำให้ความทนแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมในวันที่ 1 มีค่ามากที่สุด แม้จะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับไวท์โปรรูทเอ็มทีเอในวันที่ 1 ($p=0.55$) และวันที่ 21 ($p=0.70$) แต่การผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมด้วยสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ ทำให้วัสดุมีความทนแรงอัดในวันที่ 21 มากกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p=0.021$) เมื่อพิจารณาในอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์เดียวกัน โดยในวันที่ 21 ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีความทนแรงอัดมากที่สุดแตกต่างจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.001$) ทั้งนี้วัสดุในกลุ่มเดียวกันเมื่อปล่อยทิ้งไว้นานขึ้นจะมีความทนแรงอัดเพิ่มมากขึ้น ความทนแรงอัดในช่วงเวลาที่แตกต่างกันอาจอธิบายได้ด้วยความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีและการกระจายของอนุภาค การเพิ่มขึ้นของความทนแรงอัดในช่วงวันที่ 21 เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งปริมาณของสารประกอบดังกล่าวอาจมีความแตกต่างกันในวัสดุทั้ง 3 ชนิด ทำให้อัตราการเกิดความทนแรงอัดมีความแตกต่างกันไปด้วย

ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์อยู่ในช่วงขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรถึงขนาดใหญ่มากกว่า 30 ไมโครเมตร[103, 104] จากผลการศึกษาแม้ว่าขนาดของอนุภาคเฉลี่ยและการกระจายของขนาดอนุภาคจะมีความใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวัสดุทั้ง 3 ชนิด แต่ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอเป็นวัสดุที่มีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรมากที่สุด ส่วนพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมเป็นวัสดุซึ่งมีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 ไมโครเมตรมากที่สุด จากผลการศึกษาพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรถึงอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตรในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีปริมาณร้อยละ 73.87 ร้อยละ 69.42 และร้อยละ 73.12 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Komabayashi และ Spangberg ในปีค.ศ. 2008[103] ที่พบว่าอนุภาคที่มีขนาด 6 ไมโครเมตรถึง 10 ไมโครเมตร มีปริมาณประมาณร้อยละ 65 สำหรับเกรย์โพรรูทเอ็มทีเอ ร้อยละ 48 สำหรับเกรย์เอ็มทีเอแองเจลัส และร้อยละ 70 สำหรับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ขณะที่พบปริมาณอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 30 ไมโครเมตรน้อยมาก[104]

การศึกษาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและการปรับปรุงขนาดอนุภาคให้เล็กลงอาจช่วยเสริมสร้างความเข้าใจและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้มีความทนแรงอัดเพิ่มมาก

ขึ้น การแข็งตัวที่เร็วขึ้น ในขณะเดียวกันอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนขณะแข็งตัวช่วงแรกเพิ่มมากขึ้น[105] ซึ่งนับเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งที่ต้องพึงระลึกถึง

ช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน พอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีการคายความร้อนออกมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต การคายความร้อนจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป จากการศึกษาพบว่าในนาทีที่ 2 ภายหลังผสมซีเมนต์เสร็จ วัสดุมีการคายความร้อนออกมาเล็กน้อย โดยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดามีการคายความร้อนมากที่สุดและทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้น 0.96 องศาเซลเซียส ในขณะที่ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีอุณหภูมิสูงขึ้น 0.92 และ 0.34 องศาเซลเซียสตามลำดับ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมจะเริ่มมีการดูดความร้อนทำให้วัสดุมีอุณหภูมิลดลง 0.02 ถึง 0.59 องศาเซลเซียสในช่วงนาทีที่ 16 ถึงนาทีที่ 34 ขณะที่นาทีที่ 60 พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีการดูดความร้อนทำให้อุณหภูมิลดลง 0.40 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดค่อนข้างน้อยและมีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน จากการศึกษาของ Zach และ Cohen ในปีค.ศ. 1965[106] พบว่าการให้ความร้อนแก่เนื้อเยื่อในเพิ่มขึ้น 2.2 องศาเซลเซียสยังไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางลักษณะอนุกายวิภาคศาสตร์ (histology) ขณะที่การให้ความร้อนแก่เนื้อเยื่อในเพิ่มขึ้น 5.55 องศาเซลเซียส เริ่มทำให้เกิดการตอบสนองของเซลล์สร้างเนื้อฟันในบางตำแหน่ง โดยพบการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสของเซลล์สร้างเนื้อฟันเข้าไปอยู่ในท่อเนื้อฟัน กระบวนการซ่อมแซมสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์

การศึกษาในหัวข้อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และพอร์ต-แลนด์ซีเมนต์แข็งตัวมีค่อนข้างจำกัด การศึกษาของ Wiltbank และคณะในปีค.ศ. 2007[86] พบว่าภายหลังผสมไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ และเกรย์โปรรูทเอ็มทีเอมีการคายความร้อนโดยทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส ขณะที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 2 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวไม่ได้แจ้งสภาพการควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง ในงานวิจัยนี้จึงมีการควบคุมอุณหภูมิห้องและวัดอุณหภูมิแม่แบบที่ใช้ใส่วัสดุก่อนทำการหักลบกับอุณหภูมิของวัสดุขณะแข็งตัว และทำการวัดเป็นเวลาต่อเนื่องเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะวัสดุแข็งตัวอย่างต่อเนื่อง

การทดสอบความเป็นกรด-ด่างขณะวัสดุแข็งตัวพบว่า วัสดุทุกกลุ่มมีความเป็นด่างทันทีหลังผสมน้ำ โดยไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีแนวโน้มเป็นด่างมากกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาและ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอัตราส่วนของของเหลวต่อผงซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ (ตามบริษัทผู้ผลิตแนะนำ) มากกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาและ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม ทำให้การแตกตัวของไฮดรอกซิลไอออนจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เกิดได้มากกว่าการแตกตัวของไฮดรอกซิลไอออน

ดังกล่าวมีความสำคัญในกระบวนการกระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง[107] โดยออกฤทธิ์ต่อต้านกรดแลกติกที่ผลิตจากเซลล์สลายกระดูก (osteoclast) และทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ปรับลดความเป็นกรดในเนื้อเยื่อซึ่งเกิดจากกระบวนการอักเสบ[108] โดยไอออนดังกล่าวร่วมกับการกระตุ้นจากแคลเซียมไอออนทำให้เกิดกระบวนการหายของเนื้อเยื่อใน จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการยังพบอีกว่าความเป็นกรด-ด่างที่ค่าพีเอช 7.80 สามารถกระตุ้นให้เซลล์เนื้อเยื่อในของมนุษย์หลั่งเอนไซม์แอลคาไลน์ฟอสฟาเตส (alkaline phosphatase) และกระตุ้นให้เกิดการตกผลึกของกลุ่มเนื้อเยื่อแข็ง รวมถึงมีความสามารถในการกระตุ้นระดับของบีเอ็มพีทูเอ็ม-อาร์เอ็นเอ (BMP-2 mRNA) ซึ่งส่งเสริมกระบวนการเลื่อนตำแหน่ง และการเปลี่ยนสภาพของเซลล์สร้างเนื้อฟันในเซลล์เนื้อเยื่อในให้สูงขึ้นได้[109] ดังนั้นถึงแม้ความเป็นด่างของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมจะน้อยกว่าความเป็นด่างของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ (ที่เวลา 60 นาที พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีความเป็นกรด-ด่างที่ค่าพีเอช 10.96 ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีค่าพีเอช 12.01) แต่ความเป็นด่างดังกล่าวน่าจะเพียงพอต่อการกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งได้ อย่างไรก็ตามการศึกษาผลการปลดปล่อยไฮดรอกซิลไอออนและแคลเซียมไอออนจากวัสดุในช่วงเวลาต่าง ๆ อาจมีความจำเป็นในการพัฒนาวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดปราศจากยิปซัมต่อไปในอนาคต

นอกจากเวลาการแข็งตัว ความทนแรงอัด อุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่างขณะแข็งตัวแล้ว องค์ประกอบทางเคมีและโลหะหนักปนเปื้อนเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดมีไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต และ แคลเซียมอลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบคล้ายคลึงกัน แตกต่างกันที่ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอมีส่วนผสมของบิสมัทออกไซด์ และแอนไฮไดรด์แคลเซียมซัลเฟต ขณะที่สามารถตรวจพบยิปซัมในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา แต่ไม่สามารถตรวจพบสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เนื่องจากมีการแยกวัตถุดิบออกจากขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตทำให้ไม่เกิดการปนเปื้อนของสารประกอบดังกล่าว สอดคล้องกับการตรวจสอบปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูโอเรสเซนส์ สเปกโทรมิเตอร์และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดซึ่งไม่พบการมีอยู่ของธาตุซัลเฟอร์ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบปริมาณธาตุด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูโอเรสเซนส์ สเปกโทรมิเตอร์และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดไม่สามารถตรวจพบธาตุซัลเฟอร์ในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ ขัดแย้งกับการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตรวจพบสารประกอบแอนไฮไดรด์แคลเซียมซัลเฟต ซึ่งมีธาตุซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สารประกอบดังกล่าวมีปริมาณน้อยมาก ในขณะที่พื้นที่ของไวท์โปรรูทเอ็มทีเอที่เลือกทำการศึกษาชนิดและปริมาณของธาตุดังกล่าวเมื่อสังเกตผ่านกล้อง

จุลทรรศน์แบบส่องกราด ไม่มีธาตุดังกล่าวปรากฏอยู่ และถือเป็นข้อจำกัดหนึ่งของการวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่องมือดังกล่าว

จากการทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูโอเรสเซนส์ สเปกโทรมิเตอร์และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดไม่พบโลหะหนัก เนื่องจากโลหะหนักมีปริมาณน้อยและอาจหลบซ่อนอยู่ใต้พื้นผิวของชิ้นงานทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีดังกล่าว การตรวจสอบปริมาณโลหะหนักตามมาตรฐานไอเอสโอ 9917 และไอเอสโอ 2590 จึงมีคำแนะนำในการเตรียมชิ้นงานที่ค่อนข้างละเอียดรัดกุมเพื่อตรวจสอบโลหะหนักปริมาณเล็กน้อยที่อาจปนเปื้อนอยู่ในวัสดุ รวมถึงมีข้อกำหนดในการป้องกันการปนเปื้อนของโลหะหนักจากกระบวนการเตรียมชิ้นงาน และมีการใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อสกัดเอาโลหะหนักในซีเมนต์ดังกล่าวไปทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยกระบวนการที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการศึกษาใดปฏิบัติตามมาตรฐานดังกล่าวอย่างเคร่งครัด ทำให้การอ้างอิงเปรียบเทียบค่าปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนกับข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ (ไอเอสโอ 9917-1:2007) ไม่สามารถทำได้ จากการทดสอบปริมาณโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในซีเมนต์ตามวิธีการมาตรฐานไอเอสโอ 9917 และไอเอสโอ 2590 พบว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีปริมาณสารหนูเจือปนน้อยกว่าข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ (ไอเอสโอ 9917-1:2007) (0.500 และ 0.667 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วนตามลำดับ) ซึ่งกำหนดให้ซีเมนต์ในทางทันตกรรมมีการเจือปนของสารหนูได้ไม่เกิน 2 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วน ขณะที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาซึ่งจำหน่ายทั่วไปมีสารหนูเจือปนมากถึง 3 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วน หรือมากกว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมจากห้องปฏิบัติการประมาณ 6 เท่าและ 4.50 เท่าตามลำดับ โดยทั่วไปสารหนูมีความสามารถในการยับยั้งการผลิตเอทีพีและลดอัตราการทำงานของ ไมโทคอนเดรีย ทำให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารอนุมูลอิสระจำนวนมากคั่งค้างอยู่ภายในเซลล์ เป็นผลให้เซลล์ตายและเกิดการล้มเหลวของอวัยวะเกิดขึ้น อาจพบสภาวะเลือดออกอย่างรุนแรงหรือการทำลายของเยื่อบุต่างๆ ภายในร่างกาย แม้ว่าองค์การอนามัยโลกจะกำหนดให้ร่างกายคนเราสามารถรับสารหนูซึ่งอาจเจือปนอยู่ในอาหารได้วันละไม่เกิน 0.002 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม หรือ 0.1 มิลลิกรัมในกรณีที่มีน้ำหนักตัว 50 กิโลกรัม[85] ซึ่งนับเป็นปริมาณที่ค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับการปนเปื้อนตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ อย่างไรก็ตามผลที่กล่าวไปแล้วเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นทางระบบ ในการใช้งานปิดรอยทะลุโพรงเนื้อเยื่อในจึงควรคำนึงถึงผลกระทบเฉพาะตำแหน่งซึ่งอาจเกิดขึ้นในกรณีที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักมากเกินไปด้วย

ซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณสารตะกั่วเจือปนอยู่ในข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับปริมาณโลหะหนักในซีเมนต์ (ไอเอสโอ 9917-1:2007) ซึ่งกำหนดให้ซีเมนต์ในทางทันตกรรมมีการ

เจือปนของสารตะกั่วได้ไม่เกิน 100 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วน แม้จะทำการตรวจพบสารตะกั่วเจือปนในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดามากกว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมอย่างน้อย 14 เท่าก็ตาม ในขณะที่ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีปริมาณสารตะกั่วเจือปนน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนดถึง 400 เท่า (ไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและ พอร์ต-แลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีการปนเปื้อนของสารตะกั่วน้อยกว่า 0.250 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วน ขณะที่พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดามีการปนเปื้อนของสารตะกั่ว 3.500 ส่วนในซีเมนต์ล้านส่วน)

สำหรับสารแคดเมียมซึ่งเป็นโลหะหนักอีกชนิดที่มีรายงานถึงการปนเปื้อนอยู่ในชั้นดินและหินบนผิวโลก พบว่ามีปริมาณค่อนข้างน้อยในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ (25 ส่วนในซีเมนต์พันล้านส่วน) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม (50 ส่วนในซีเมนต์พันล้านส่วน) ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับปริมาณแคดเมียมที่ปะปนอยู่ในอาหารทุกชนิด (2 ถึง 40 ส่วนในซีเมนต์พันล้านส่วน) ในขณะที่พบการปนเปื้อนของแคดเมียมค่อนข้างมากในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา (367 ส่วนในซีเมนต์พันล้านส่วน) โดยปรกติร่างกายมีการรับสารแคดเมียมจากอาหารและน้ำดื่มประมาณ 30 ไมโครกรัมต่อวัน ขณะที่การปนเปื้อนของแคดเมียมในไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและพอร์ต-แลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม 1 มิลลิกรัม มีเพียง $2.5x10^{-5}$ ไมโครกรัม และ $5.0x10^{-5}$ ไมโครกรัม ตามลำดับ ซึ่งนับเป็นปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณแคดเมียมที่ร่างกายได้รับในแต่ละวันค่อนข้างมาก ดังนั้นในแง่การปนเปื้อนของโลหะหนัก จึงมีความปลอดภัยในการนำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมาใช้งานในทางคลินิก อย่างไรก็ตามปริมาณสารโลหะหนักที่ตรวจพบยังไม่มีการหักลบกับปริมาณสารโลหะหนักซึ่งปะปนอยู่ในสารละลายมาตรฐาน ซึ่งอาจทำให้ปริมาณสารหนู สารตะกั่ว และแคดเมียมมีค่าน้อยลงกว่าที่รายงาน ทั้งนี้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมมีปริมาณสารโลหะหนักน้อยกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาที่จำหน่ายในท้องตลาด อาจเนื่องมาจากการปนเปื้อนระหว่างกระบวนการบดเม็ดปูนด้วยลูกกลิ้งโลหะ การขนย้าย และการส่งถ่ายผลิตภัณฑ์ซึ่งไม่ได้มีการควบคุมการปนเปื้อนที่เพียงพอในกลุ่มตัวอย่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ ส่วนการเตรียมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม มีการแยกตัวอย่างออกจากกระบวนการผลิตและทำการบดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีการควบคุมการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์ที่รัดกุมกว่า จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้พบการปนเปื้อนของโลหะหนักค่อนข้างน้อยกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นเพียงการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อเป็นแนวทางพื้นฐานในการพัฒนาวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตามการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพทั้งการทดสอบในห้องปฏิบัติการ *(in vitro)* และการทดสอบในสิ่งมีชีวิต *(in vivo)* ก่อนนำไปใช้งานทางคลินิกยังคงมีความจำเป็นต้องทดสอบก่อนนำไปใช้ในมนุษย์ต่อไป

สรุปผลการวิจัย

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม เมื่อนำมาผสมกับสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์ในปริมาณความเข้มข้นและอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถลดเวลาการแข็งตัวของวัสดุ ปรับปรุงคุณสมบัติการไหลแผ่ให้ดีขึ้น ขณะที่วัสดุมีความทนแรงอัดใกล้เคียงกับไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะแข็งตัวเพียงเล็กน้อย มีความเป็นด่างต่ำกว่าไวท์โปรรูทเอ็มทีเอเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคไม่แตกต่างจากไวท์โปรรูทเอ็มทีเอ มีปริมาณโลหะหนักปะปนอยู่ใกล้เคียงกับไวท์โปรรูทเอ็มทีเอและไม่เกินมาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ยังมีปริมาณธาตุและองค์ประกอบของสารประกอบคล้ายคลึงกัน พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมสารละลายโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์จึงมีความเหมาะสมในการพัฒนาเป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรงต่อไป

รายการอ้างอิง

(1) กองทันตสาธารณสุข กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. **รายงานผลการสำรวจสภาวะทันตสุขภาพแห่งชาติครั้งที่ 6 พ.ศ. 2549-2550.** กรุงเทพมหานคร: กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2551

(2) Bergenholtz, G., HØrsted, P., and Reit, C. **Textbook of Endodontology.** 1st ed., Blackwell Munksgaard, 2003.

(3) Lim, K. C., and Kirk, E. E. Direct pulp capping: a review. **Endod Dent Traumatol.** 3 (October 1987): 213-219.

(4) Ward, J. Vital pulp therapy in cariously exposed permanent teeth and its limitations. **Aust Endod J.** 28 (April 2002): 29-37.

(5) Glass, R. L., and Zander, H. A. Pulp healing. **J Dent Res.** 28 (April 1949): 97-107.

(6) Heys, D. R., Heys, R. J., Cox, C. F., and Avery, J. K. The response of four calcium hydroxides on monkey pulps. **J Oral Pathol.** 9 (November 1980): 372-379.

(7) Kirk, E. E., Lim, K. C., and Khan, M. O. A comparison of dentinogenesis on pulp capping with calcium hydroxide in paste and cement form. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol.** 68 (August 1989): 210-219.

(8) Haskell, E. W., Stanley, H. R., Chellemi, J., and Stringfellow, H. Direct pulp capping treatment: a long-term follow-up. **J Am Dent Assoc.** 97 (October 1978): 607-612.

(9) Baume, L. J., and Holz, J. Long term clinical assessment of direct pulp capping. **Int Dent J.** 31 (December 1981): 251-260.

(10) Hørsted, P., Sandergaard, B., Thylstrup, A., El Attar, K., and Fejerskov, O. A retrospective study of direct pulp capping with calcium hydroxide compounds. **Endod Dent Traumatol.** 1 (February 1985): 29-34.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(11) Mccomb, D. Comparison of physical properties of commercial calcium hydroxide lining cements. **J Am Dent Assoc.** 107 (October 1983): 610-613.

(12) Hwas, M., and Sandrik, J. L. Acid and water solubility and strength of calcium hydroxide bases. **J Am Dent Assoc.** 108 (January 1984): 46-48.

(13) Phillips, R. W., Crim, G., Swartz, M. L., and Clark, H. E. Resistance of calcium hydroxide preparations to solubility in phosphoric acid. **J Prosthet Dent.** 52 (September 1984): 358-360.

(14) Cox, C. F., and Suzuki, S. Re-evaluating pulp protection: calcium hydroxide liners vs. cohesive hybridization. **J Am Dent Assoc.** 125 (July 1994): 823-831.

(15) Cox, C. F., Subay, R. K., Ostro, E., Suzuki, S., and Suzuki, S. H. Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. **Oper Dent.** 21 (January-February 1996): 4-11.

(16) Camilleri, J. The physical properties of accelerated Portland cement for endodontic use. **Int Endod J.** 41 (February 2008): 151-157.

(17) Parirokh, M., and Torabinejad, M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. **J Endod.** 36 (March 2010): 400-413.

(18) Watts, A., and Paterson, R. C. Simple metallic compounds as pulp-capping agents. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol.** 48 (December 1979): 561-563.

(19) Schroder, U. Effects of calcium hydroxide-containing pulp-capping agents on pulp cell migration, proliferation, and differentiation. **J Dent Res.** 64 (April 1985): 541-548.

(20) Veis, A. The role of dental pulp--thoughts on the session on pulp repair processes. **J Dent Res.** 64 (April 1985): 552-554.

(21) Cox, C. F., et al. Pulp capping of dental pulp mechanically exposed to oral microflora: a 1-2 year observation of wound healing in the monkey. **J Oral Pathol**. 14 (February 1985): 156-168.

(22) Brannstrom, M. Communication between the oral cavity and the dental pulp associated with restorative treatment. **Oper Dent**. 9 (Spring 1984): 57-68.

(23) Cox, C. F., et al. Biocompatibility of primer, adhesive and resin composite systems on non-exposed and exposed pulps of non-human primate teeth. **Am J Dent**. 11 (January 1998): S55-63.

(24) Subay, R. K., and Asci, S. Human pulpal response to hydroxyapatite and a calcium hydroxide material as direct capping agents. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol**. 76 (October 1993): 485-492.

(25) Olsson, H., Davies, J. R., Holst, K. E., Schroder, U., and Petersson, K. Dental pulp capping: effect of Emdogain Gel on experimentally exposed human pulps. **Int Endod J**. 38 (March 2005): 186-194.

(26) Pitt Ford T.R., Torabinejad M, Abedi H.R., Bakland L.K., and Kariyawasam S.P. Using mineral trioxide aggregate as a pulp-capping materials. **J Am Dent Assoc**. 127 (October 1996): 1491– 1494.

(27) Torabinejad, M., Watson, T. F., and Pitt Ford, T. R. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. **J Endod**. 19 (December 1993): 591-595.

(28) Lee, S. J., Monsef, M., and Torabinejad, M. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate for repair of lateral root perforations. **J Endod**. 19 (November 1993): 541-544.

(29) Torabinejad, M., Hong, C. U., Mcdonald, F., and Pitt Ford, T. R. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. **J Endod**. 21 (July 1995): 349-353.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(30) Koh, E. T., Torabinejad, M., Pitt Ford, T. R., Brady, K., and Mcdonald, F. Mineral trioxide aggregate stimulates a biological response in human osteoblasts. **J Biomed Mater Res.** 37 (December 1997): 432-439.

(31) Koh, E. T., Mcdonald, F., Pitt Ford, T. R., and Torabinejad, M. Cellular response to Mineral Trioxide Aggregate. **J Endod.** 24 (August 1998): 543-547.

(32) Mitchell, P. J., Pitt Ford, T. R., Torabinejad, M., and Mcdonald, F. Osteoblast biocompatibility of mineral trioxide aggregate. **Biomaterials.** 20 (January 1999): 167-173.

(33) Torabinejad, M., Hong, C. U., Lee, S. J., Monsef, M., and Pitt Ford, T. R. Investigation of mineral trioxide aggregate for root-end filling in dogs. **J Endod.** 21 (December 1995): 603-608.

(34) Torabinejad, M., et al. Histologic assessment of mineral trioxide aggregate as a root-end filling in monkeys. **J Endod.** 23 (April 1997): 225-228.

(35) Holland, R., et al. Reaction of rat connective tissue to implanted dentin tubes filled with mineral trioxide aggregate or calcium hydroxide. **J Endod.** 25 (March 1999): 161-166.

(36) Holland, R., et al. Reaction of rat connective tissue to implanted dentin tubes filled with a white mineral trioxide aggregate. **Braz Dent J.** 13 (January 2002): 23-26.

(37) Torabinejad, M., and Chivian, N. Clinical applications of mineral trioxide aggregate. **J Endod.** 25 (March 1999): 197-205.

(38) Main, C., Mirzayan, N., Shabahang, S., and Torabinejad, M. Repair of root perforations using mineral trioxide aggregate: a long-term study. **J Endod.** 30 (February 2004): 80-83.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(39) Shabahang, S., and Torabinejad, M. Treatment of teeth with open apices using mineral trioxide aggregate. **Pract Periodontics Aesthet Dent**. 12 (April 2000): 315-320; quiz 322.

(40) Eidelman, E., Holan, G., and Fuks, A. B. Mineral trioxide aggregate vs. formocresol in pulpotomized primary molars: a preliminary report. **Pediatr Dent**. 23 (January-February 2001): 15-18.

(41) Agamy, H. A., Bakry, N. S., Mounir, M. M., and Avery, D. R. Comparison of mineral trioxide aggregate and formocresol as pulp-capping agents in pulpotomized primary teeth. **Pediatr Dent**. 26 (July-August 2004): 302-309.

(42) Holan, G., Eidelman, E., and Fuks, A. B. Long-term evaluation of pulpotomy in primary molars using mineral trioxide aggregate or formocresol. **Pediatr Dent**. 27 (March-April 2005): 129-136.

(43) Tziafas, D., Pantelidou, O., Alvanou, A., Belibasakis, G., and Papadimitriou, S. The dentinogenic effect of mineral trioxide aggregate (MTA) in short-term capping experiments. **Int Endod J**. 35 (March 2002): 245-254.

(44) Andelin, W. E., Shabahang, S., Wright, K., and Torabinejad, M. Identification of hard tissue after experimental pulp capping using dentin sialoprotein (DSP) as a marker. **J Endod**. 29 (October 2003): 646-650.

(45) Faraco Junior, I. M., and Holland, R. Histomorphological response of dogs' dental pulp capped with white mineral trioxide aggregate. **Braz Dent J**. 15 (March 2004): 104-108.

(46) Nair, P. N., Duncan, H. F., Pitt Ford, T. R., and Luder, H. U. Histological, ultrastructural and quantitative investigations on the response of healthy human pulps to experimental capping with mineral trioxide aggregate: a randomized controlled trial. **Int Endod J**. 41 (February 2008): 128-150.

(47) Faraco Junior, I. M., and Holland, R. Response of the pulp of dogs to capping with mineral trioxide aggregate or a calcium hydroxide cement. **Dent Traumatol**. 17 (August 2001): 163-166.

(48) Aeinehchi, M., Eslami, B., Ghanbariha, M., and Saffar, A. S. Mineral trioxide aggregate (MTA) and calcium hydroxide as pulp-capping agents in human teeth: a preliminary report. **Int Endod J**. 36 (March 2003): 225-231.

(49) Accorinte Mde, L., et al. Evaluation of mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide cement as pulp-capping agents in human teeth. **J Endod**. 34 (January 2008): 1-6.

(50) Bogen, G., Kim, J. S., and Bakland, L. K. Direct pulp capping with mineral trioxide aggregate: an observational study. **J Am Dent Assoc**. 139 (March 2008): 305-315.

(51) Eldeniz, A. U., Hadimli, H. H., Ataoglu, H., and Orstavik, D. Antibacterial effect of selected root-end filling materials. **J Endod**. 32 (April 2006): 345-349.

(52) Kuratate, M., et al. Immunohistochemical analysis of nestin, osteopontin, and proliferating cells in the reparative process of exposed dental pulp capped with mineral trioxide aggregate. **J Endod**. 34 (August 2008): 970-974.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(53) Abdullah, D., Ford, T. R., Papaioannou, S., Nicholson, J., and Mcdonald, F. An evaluation of accelerated Portland cement as a restorative material. **Biomaterials**. 23 (October 2002): 4001-4010.

(54) Guven, G., Cehreli, Z. C., Ural, A., Serdar, M. A., and Basak, F. Effect of mineral trioxide aggregate cements on transforming growth factor beta1 and bone morphogenetic protein production by human fibroblasts in vitro. **J Endod**. 33 (April 2007): 447-450.

(55) Deller-Quinn, M., and Perinpanayagam, H. Osteoblast expression of cytokines is altered on MTA surfaces. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 108 (August 2009): 302-307.

(56) Sarkar, N. K., Caicedo, R., Ritwik, P., Moiseyeva, R., and Kawashima, I. Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. **J Endod.** 31 (February 2005): 97-100.

(57) Bozeman, T. B., Lemon, R. R., and Eleazer, P. D. Elemental analysis of crystal precipitate from gray and white MTA. **J Endod.** 32 (May 2006): 425-428.

(58) Reyes-Carmona, J. F., Felippe, M. S., and Felippe, W. T. Biomineralization ability and interaction of mineral trioxide aggregate and white portland cement with dentin in a phosphate-containing fluid. **J Endod.** 35 (May 2009): 731-736.

(59) Parirokh, M., and Torabinejad, M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. **J Endod.** 36 (January 2010): 16-27.

(60) Mooney, G. C., and North, S. The current opinions and use of MTA for apical barrier formation of non-vital immature permanent incisors by consultants in paediatric dentistry in the UK. **Dent Traumatol.** 24 (February 2008): 65-69.

(61) Johnson, B. R. Considerations in the selection of a root-end filling material. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 87 (April 1999): 398-404.

(62) Torabinejad M. , White D. J. Tooth Filling Material and US patent 5,769,638. 1995.

(63) Camilleri, J., et al. The constitution of mineral trioxide aggregate. **Dent Mater.** 21 (April 2005): 297-303.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(64) Camilleri, J. Characterization and chemical activity of Portland cement and two experimental cements with potential for use in dentistry. **Int Endod J.** 41 (September 2008): 791-799.

(65) Song, J. S., Mante, F. K., Romanow, W. J., and Kim, S. Chemical analysis of powder and set forms of Portland cement, gray ProRoot MTA, white ProRoot MTA, and gray MTA-Angelus. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 102 (December 2006): 809-815.

(66) Islam, I., Chng, H. K., and Yap, A. U. X-ray diffraction analysis of mineral trioxide aggregate and Portland cement. **Int Endod J.** 39 (March 2006): 220-225.

(67) Coomaraswamy, K. S., Lumley, P. J., and Hofmann, M. P. Effect of bismuth oxide radioopacifier content on the material properties of an endodontic Portland cement-based (MTA-like) system. **J Endod.** 33 (March 2007): 295-298.

(68) Saidon, J., He, J., Zhu, Q., Safavi, K., and Spangberg, L. S. Cell and tissue reactions to mineral trioxide aggregate and Portland cement. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 95 (April 2003): 483-489.

(69) Belio-Reyes, I. A., Bucio, L., and Cruz-Chavez, E. Phase composition of ProRoot mineral trioxide aggregate by X-ray powder diffraction. **J Endod.** 35 (June 2009): 875-878.

(70) De Deus, G., Ximenes, R., Gurgel-Filho, E. D., Plotkowski, M. C., and Coutinho-Filho, T. Cytotoxicity of MTA and Portland cement on human ECV 304 endothelial cells. **Int Endod J.** 38 (September 2005): 604-609.

(71) Camilleri, J., Montesin, F. E., Di Silvio, L., and Pitt Ford, T. R. The chemical constitution and biocompatibility of accelerated Portland cement for endodontic use. **Int Endod J.** 38 (November 2005): 834-842.

(72) Estrela, C., Bammann, L. L., Estrela, C. R., Silva, R. S., and Pecora, J. D. Antimicrobial and chemical study of MTA, Portland cement, calcium hydroxide paste, Sealapex and Dycal. **Braz Dent J**. 11 (January 2000): 3-9.

(73) Holland, R., et al. Healing process of dog dental pulp after pulpotomy and pulp covering with mineral trioxide aggregate or Portland cement. **Braz Dent J**. 12 (February 2001): 109-113.

(74) Min, K. S., et al. Human pulp cells response to Portland cement in vitro. **J Endod**. 33 (February 2007): 163-166.

(75) Menezes, R., Bramante, C. M., Letra, A., Carvalho, V. G., and Garcia, R. B. Histologic evaluation of pulpotomies in dog using two types of mineral trioxide aggregate and regular and white Portland cements as wound dressings. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod**. 98 (September 2004): 376-379.

(76) Menezes, R., et al. Microscopic analysis of dog dental pulp after pulpotomy and pulp protection with mineral trioxide aggregate and white Portland cement. **J Appl Oral Sci**. 12 (February 2004): 104-107.

(77) Razmi, H., Sharifi, D., Mottahari, P., and Khosravi, M. R. Pulp tissue reaction of dog canines to Root MTA and Portland cement compared to ProRoot MTA as pulp capping agents. **J Dent, Tehran University of Medical Science**. 3 (February 2006): 63-68.

(78) Camilleri, J., Montesin, F. E., Papaioannou, S., Mcdonald, F., and Pitt Ford, T. R. Biocompatibility of two commercial forms of mineral trioxide aggregate. **Int Endod J**. 37 (October 2004): 699-704.

(79) Islam, I., Chng, H. K., and Yap, A. U. Comparison of the physical and mechanical properties of MTA and portland cement. **J Endod**. 32 (March 2006): 193-197.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(80) Duarte, M. A., De Oliveira Demarchi, A. C., Yamashita, J. C., Kuga, M. C., and De Campos Fraga, S. Arsenic release provided by MTA and Portland cement. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 99 (May 2005): 648-650.

(81) Danesh, G., Dammaschke, T., Gerth, H. U., Zandbiglari, T., and Schafer, E. A comparative study of selected properties of ProRoot mineral trioxide aggregate and two Portland cements. **Int Endod J.** 39 (March 2006): 213-219.

(82) Oliveira, M. G., et al. Comparative chemical study of MTA and Portland cements. **Braz Dent J.** 18 (January 2007): 3-7.

(83) De-Deus, G., and Coutinho-Filho, T. The use of white Portland cement as an apical plug in a tooth with a necrotic pulp and wide-open apex: a case report. **Int Endod J.** 40 (August 2007): 653-660.

(84) Conti, T. R., et al. Pulpotomies with Portland cement in human primary molars. **J Appl Oral Sci.** 17 (January-February 2009): 66-69.

(85) Primus, C. M. Comments on "arsenic release provided by MTA and Portland cement" by Duarte MA, et al. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.** 101 (April 2006): 416-417; author reply 417-418.

(86) Wiltbank, K. B., Schwartz, S. A., and Schindler, W. G. Effect of selected accelerants on the physical properties of mineral trioxide aggregate and Portland cement. **J Endod.** 33 (October 2007): 1235-1238.

(87) Ber, B. S., Hatton, J. F., and Stewart, G. P. Chemical modification of proroot mta to improve handling characteristics and decrease setting time. **J Endod.** 33 (October 2007): 1231-1234.

(88) Antunes Bortoluzzi, E., Juárez Broon, N., Antonio Hungaro Duarte, M., De Oliveira Demarchi, A. C., and Monteiro Bramante, C. The use of a setting accelerator and its effect on pH and calcium ion release of mineral trioxide aggregate and white Portland cement. **J Endod.** 32 (December 2006): 1194-1197.

(89) Neville, A.M. **Properties of concrete.** 3rd ed., London: The English Language Book Society and Pittman Publishing, 1981.

(90) Nawy, E.G. **Concrete Construction Engineering Handbook.** 2nd ed., FL: CRC Press, 2008.

(91) ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต.** กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย, 2551.

(92) Mehta, P.M., and Monteiro, P.J.M. **Concrete Microstructure, Properties, and Materials.** 3rd ed., New York: The McGraw-Hill Companies, 2006.

(93) Sakai, E., Ishida, A., and Ohta, A. New trends in the development of chemical admixtures in Japan. **J Aavanced Concrete Technology.** 4 (June 2006): 211-223.

(94) Rai, S., and Gajbhiye, N.S. Adsorption of comb-type superplasticizers on calcium carbonate in alkaline medium in presence of electrolytes and rheological properties. **Indian J Chem Technology.** 15 (July 2008): 349-354.

(95) Puertas, F., Santos, H., Palacios, M., and Martı´Nez-Ramı´Rez, S. Polycarboxylate superplasticizers admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. **Advances in Cement Research.** 17 (April 2005): 77-89.

(96) Winnefeld, F., et al. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers and cements: Influence of polymer structure and C_3A-content of cement. 12th International Congress on the Chemistry of Cement; 2007 [Online]; Montreal, Canada. 2007. Available from: http://library.eawag-empa.ch/empa_publications_2007_open_access/EMPA20070147.pdf [2010, January 16th]

(97) Plank, J., Zhimin, D., Keller, H., Hossle, F.V., and Seidl, W. Fundamental mechanisms for polycarboxylate interaction into C_3A hydrate phases and the role of sulfate present in cement. **Cement and Concrete Research**. 40 (January 2010): 45-57.

(98) Lothenbach, B., Winnefeld, F., and Figi, R. The influence of superplasticizers on the hydration of portland cement. 12th International Congress on the Chemistry of Cement; 2007 [Online]; Montreal, Canada. 2007. Available from:http://library.eawagempa.ch/empa_publications_2007_open_access /EMPA20070145.pdf. [2010, January 16th]

(99) Zingg, A., et al. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C3A amounts. **Cement & Concrete Composites**. 31 (March 2009): 153-162.

(100) De, T. K., et al. Polycarboxylic acid nanoparticles for ophthalmic drug delivery: an ex vivo evaluation with human cornea. **J Microencapsul**. 21 (December 2004): 841-855.

(101) Vasilevskaya, V. V., Leclercq, L., Boustta, M., Vert, M., and Khokhlov, A. R. . Study of Interpolymer Complexes of Oppositely Charged Macromolecules with Different Affinity to Solvent. **Macromolecules**. 40 (July 2007): 5934-5940.

(102) Mcwalter, G. M., El-Kafrawy, A. H., and Mitchell, D. F. Pulp capping in monkeys with a calcium-hydroxide compound, an antibiotic, and a polycarboxylate cement. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol**. 36 (July 1973): 90-100.

(103) Komabayashi, T., and Spangberg, L. S. Comparative analysis of the particle size and shape of commercially available mineral trioxide aggregates and Portland cement: a study with a flow particle image analyzer. **J Endod**. 34 (January 2008): 94-98.

(104) Komabayashi, T., and Spangberg, L. S. Particle size and shape analysis of MTA finer fractions using Portland cement. **J Endod**. 34 (June 2008): 709-711.

(105) Bentz, D.P., Garboczi, E.J., Heacker, C.J., and Jensen, O.M. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials **Cement and Concrete Research**. 29 (October 1999): 1663-1671.

(106) Zach, L., and Cohen, G. Pulp Response to Externally Applied Heat. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol**. 19 (April 1965): 515-530.

(107) Tronstad, L., Andreasen, J. O., Hasselgren, G., Kristerson, L., and Riis, I. pH changes in dental tissues after root canal filling with calcium hydroxide. **J Endod**. 7 (January 1981): 17-21.

(108) Modena, K. C., et al. Cytotoxicity and biocompatibility of direct and indirect pulp capping materials. **J Appl Oral Sci**. 17 (November-December 2009): 544-554.

(109) Okabe, T., Sakamoto, M., Takeuchi, H., and Matsushima, K. Effects of pH on mineralization ability of human dental pulp cells. **J Endod**. 32 (March 2006): 198-201.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ตอนที่ 1 : การศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสมสารพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

1.1 การศึกษาเวลาแข็งตัว

1.1.1 ข้อมูลดิบแสดงเวลาแข็งตัวในการทดสอบตอนที่ 1

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	เวลาแข็งตัว (นาที)
1	OWPC + distilled	L/P = 0.33	1	50.83
			2	55.33
			3	57.33
			4	56.33
			5	54.33
2	OWPC + distilled	L/P = 0.30	1	48.33
			2	50.33
			3	51.33
			4	46.83
			5	48.83
3	OWPC + distilled	L/P = 0.27	1	23.33
			2	25.33
			3	28.33
			4	24.33
			5	28.83

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	เวลาแข็งตัว (นาที)
4	AWPC + distilled	L/P = 0.33	1	8.83
			2	8.50
			3	8.33
			4	8.33
			5	8.50
5	AWPC + distilled	L/P = 0.30	1	5.5
			2	5.67
			3	5.00
			4	5.83
			5	5.50
6	AWPC + distilled	L/P = 0.27	1	4.17
			2	4.83
			3	4.00
			4	3.83
			5	4.17
7	AWPC + 1.2% PC	L/P = 0.33	1	9.00
			2	9.50
			3	9.33
			4	9.00
			5	9.00

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	เวลาแข็งตัว (นาที)
8	AWPC + 1.2% PC	L/P = 0.30	1	5.83
			2	6.17
			3	6.17
			4	5.83
			5	6.00
9	AWPC + 1.2% PC	L/P = 0.27	1	5.67
			2	5.50
			3	5.50
			4	5.50
			5	5.67
10	AWPC + 1.8% PC	L/P = 0.33	1	9.33
			2	10.17
			3	10.00
			4	10.00
			5	9.50
11	AWPC + 1.8% PC	L/P = 0.30	1	6.83
			2	6.67
			3	7.83
			4	7.33
			5	6.67

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	เวลาแข็งตัว (นาที)
12	AWPC + 1.8% PC	L/P = 0.27	1	6.50
			2	6.17
			3	6.00
			4	6.17
			5	6.00
13	AWPC + 2.4% PC	L/P = 0.33	1	11.17
			2	11.50
			3	11.33
			4	11.33
			5	11.00
14	AWPC + 2.4% PC	L/P = 0.30	1	7.5
			2	8
			3	7.83
			4	8
			5	8
15	AWPC + 2.4% PC	L/P = 0.27	1	6.5
			2	6.5
			3	6.33
			4	6.5
			5	6.17

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1.2 แสดงข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของเวลาแข็งตัวในการทดสอบตอนที่ 1

Material	L/P_Ratio	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
1 OWPC	1 L/P=0.33	5	54.83	2.5	50.83	57.33
	2 L/P=0.30	5	49.13	1.75357	46.83	51.33
	3 L/P=0.27	5	26.03	2.43926	23.33	28.83
2 AWPC+distilled	1 L/P=0.33	5	8.498	0.20413	8.33	8.83
	2 L/P=0.30	5	5.5	0.31137	5	5.83
	3 L/P=0.27	5	4.2	0.37934	3.83	4.83
3 AWPC+1.2%PC	1 L/P=0.33	5	9.166	0.23512	9	9.5
	2 L/P=0.30	5	6	0.17	5.83	6.17
	3 L/P=0.27	5	5.568	0.09311	5.5	5.67
4 AWPC+1.8%PC	1 L/P=0.33	5	9.8	0.36325	9.33	10.17
	2 L/P=0.30	5	7.066	0.50565	6.67	7.83
	3 L/P=0.27	5	6.168	0.20413	6	6.5
5 AWPC+2.4%PC	1 L/P=0.33	5	11.266	0.18902	11	11.5
	2 L/P=0.30	5	7.866	0.21744	7.5	8
	3 L/P=0.27	5	6.4	0.14816	6.17	6.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลเวลาแข็งตัวในการทดสอบตอนที่ 1

Material	L/P_Ratio			Setting
OWPC	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	54.83
			Std. Deviation	2.5
		Most Extreme Differences	Absolute	0.221
			Positive	0.159
			Negative	-0.221
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.494
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.968
	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	49.13
			Std. Deviation	1.75357
		Most Extreme Differences	Absolute	0.168
			Positive	0.168
			Negative	-0.153
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.375
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.999
	L/P=0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	26.03
			Std. Deviation	2.43926
		Most Extreme Differences	Absolute	0.227
			Positive	0.213
			Negative	-0.227
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.508
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.959
AWPC + distilled	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	8.498
			Std. Deviation	0.20413
		Most Extreme Differences	Absolute	0.296
			Positive	0.296
			Negative	-0.205
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.662
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.773
				continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material	L/P_Ratio			Setting
AWPC + distilled	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	5.5
			Std. Deviation	0.31137
		Most Extreme Differences	Absolute	0.3
			Positive	0.146
			Negative	-0.3
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.671
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.759
	L/P=0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	4.2
			Std. Deviation	0.37934
		Most Extreme Differences	Absolute	0.332
			Positive	0.332
			Negative	-0.165
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.741
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.642
AWPC + 1.2% PC	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	9.166
			Std. Deviation	0.23512
		Most Extreme Differences	Absolute	0.36
			Positive	0.36
			Negative	-0.24
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.805
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.536
	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	6
			Std. Deviation	0.17
		Most Extreme Differences	Absolute	0.241
			Positive	0.241
			Negative	-0.241
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.54
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.933

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material	L/P_Ratio			Setting
AWPC + 1.2% PC	L/P=0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	5.568
			Std. Deviation	0.09311
		Most Extreme Differences	Absolute	0.367
			Positive	0.367
			Negative	-0.263
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.822
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.51
AWPC + 1.8% PC	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	9.8
			Std. Deviation	0.36325
		Most Extreme Differences	Absolute	0.309
			Positive	0.196
			Negative	-0.309
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.691
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.726
	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	7.066
			Std. Deviation	0.50565
		Most Extreme Differences	Absolute	0.28
			Positive	0.28
			Negative	-0.217
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.625
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.829
	L/P=0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	6.168
			Std. Deviation	0.20413
		Most Extreme Differences	Absolute	0.296
			Positive	0.296
			Negative	-0.205
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.662
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.773
				continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material	L/P_Ratio			Setting
AWPC + 2.4% PC	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	11.266
			Std. Deviation	0.18902
		Most Extreme Differences	Absolute	0.233
			Positive	0.167
			Negative	-0.233
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.52
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.95
	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	7.866
			Std. Deviation	0.21744
		Most Extreme Differences	Absolute	0.331
			Positive	0.269
			Negative	-0.331
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.74
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.643
	L/P=0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	6.4
			Std. Deviation	0.14816
		Most Extreme Differences	Absolute	0.35
			Positive	0.25
			Negative	-0.35
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.783
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.572

1.1.4 แสดงการวิเคราะห์เวลาแข็งตัวของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

Test of Between-Subjects Effects

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	18145.691[a]	14	1296.121	1201.252	0
Intercept	15767.01	1	15767.01	14612.948	0
Material	15634.514	4	3908.628	3622.537	0
L/P_Ratio	1035.349	2	517.675	479.784	0
Material * L/P_Ratio	1475.828	8	184.478	170.976	0
Error	64.739	60	1.079		
Total	33977.439	75			
Corrected Total	18210.429	74			

Test of Homogeneity of Variances

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
8.185	14	60	.000

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18145.691	14	1296.121	1201.252	.000
Within Groups	64.739	60	1.079		
Total	18210.429	74			

Robust Tests of Equality of Means

	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	1201.252	14	12.467	.000

a. Asymptotically F distributed.

Multiple Comparisons

Tamhane

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
1 OWPC + L/P 0.33	2 OWPC + L/P 0.30	5.7	1.36565	0.340	-2.512	13.912
	3 OWPC + L/P 0.27	28.80000*	1.56205	0.000	19.9908	37.6092
	4 AWPC + L/P 0.33	46.33200*	1.12175	0.000	34.9017	57.7623
	5 AWPC + L/P 0.30	49.33000*	1.12667	0.000	38.1031	60.5569
	6 AWPC + L/P 0.27	50.63000*	1.13083	0.000	39.5656	61.6944
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	45.66400*	1.12297	0.000	34.285	57.043
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	48.83000*	1.12062	0.000	37.3508	60.3092
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	49.26200*	1.11881	0.000	37.7037	60.8203
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	45.03000*	1.12977	0.000	33.9251	56.1349
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	47.76400*	1.14067	0.000	37.0527	58.4753
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	48.66200*	1.12175	0.000	37.2317	60.0923
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	43.56400*	1.12123	0.000	32.111	55.017
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	46.96400*	1.12225	0.000	35.5549	58.3731
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	48.43000*	1.12	0.000	36.9238	59.9362

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
2 OWPC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-5.7	1.36565	0.340	-13.912	2.512
	3 OWPC + L/P 0.27	23.10000*	1.3435	0.000	15.0866	31.1134
	4 AWPC + L/P 0.33	40.63200*	0.78952	0.000	32.7263	48.5377
	5 AWPC + L/P 0.30	43.63000*	0.79649	0.000	35.9909	51.2691
	6 AWPC + L/P 0.27	44.93000*	0.80236	0.000	37.4916	52.3684
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	39.96400*	0.79124	0.000	32.1272	47.8008
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	43.13000*	0.7879	0.000	35.1575	51.1025
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	43.56200*	0.78532	0.000	35.4794	51.6446
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	39.33000*	0.80087	0.000	31.8426	46.8174
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	42.06400*	0.81617	0.000	35.0246	49.1034
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	42.96200*	0.78952	0.000	35.0563	50.8677
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	37.86400*	0.78876	0.000	29.9275	45.8005
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	41.26400*	0.79023	0.000	33.387	49.141
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	42.73000*	0.78701	0.000	34.7203	50.7397
3 OWPC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-28.80000*	1.56205	0.000	-37.609	-19.9908
	2 OWPC + L/P 0.30	-23.10000*	1.3435	0.000	-31.113	-15.0866
	4 AWPC + L/P 0.33	17.53200*	1.09468	0.008	6.3872	28.6768
	5 AWPC + L/P 0.30	20.53000*	1.09972	0.004	9.5927	31.4673
	6 AWPC + L/P 0.27	21.83000*	1.10398	0.003	11.0582	32.6018
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	16.86400*	1.09593	0.010	5.7716	27.9564
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	20.03000*	1.09352	0.005	8.8351	31.2249
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	20.46200*	1.09167	0.005	9.1862	31.7378
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	16.23000*	1.1029	0.010	5.417	27.043

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	18.96400*	1.11406	0.004	8.5498	29.3782
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	19.86200*	1.09468	0.005	8.7172	31.0068
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	14.76400*	1.09414	0.017	3.596	25.932
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	18.16400*	1.0952	0.007	7.0409	29.2871
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	19.63000*	1.09288	0.006	8.4076	30.8524
4 AWPC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	-46.33200*	1.12175	**0.000**	-57.762	-34.9017
	2 OWPC + L/P 0.30	-40.63200*	0.78952	**0.000**	-48.538	-32.7263
	3 OWPC + L/P 0.27	-17.53200*	1.09468	**0.008**	-28.677	-6.3872
	5 AWPC + L/P 0.30	2.99800*	0.16651	0.000	1.972	4.024
	6 AWPC + L/P 0.27	4.29800*	0.19265	0.000	3.0074	5.5886
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-0.668	0.13925	0.140	-1.4616	0.1256
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	2.49800*	0.1188	0.000	1.816	3.18
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	2.93000*	0.10034	0.000	2.2054	3.6546
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.30200*	0.18634	0.036	-2.5264	-0.0776
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	1.432	0.24386	0.164	-0.4262	3.2902
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	2.33000*	0.1291	0.000	1.6022	3.0578
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.76800*	0.12442	0.000	-3.4717	-2.0643
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	0.632	0.13338	0.144	-0.1216	1.3856
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	2.09800*	0.1128	0.000	1.4272	2.7688
5 AWPC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-49.33000*	1.12667	**0.000**	-60.557	-38.1031
	2 OWPC + L/P 0.30	-43.63000*	0.79649	**0.000**	-51.269	-35.9909

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
5 AWPC + L/P 0.30	3 OWPC + L/P 0.27	-20.53000*	1.09972	**0.004**	-31.467	-9.5927
	4 AWPC + L/P 0.33	-2.99800*	0.16651	0.000	-4.024	-1.972
	6 AWPC + L/P 0.27	1.30000*	0.21948	0.042	0.0365	2.5635
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-3.66600*	0.17449	0.000	-4.6914	-2.6406
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-0.5	0.15865	0.866	-1.5559	0.5559
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-0.068	0.14534	1.000	-1.3074	1.1714
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-4.30000*	0.21396	0.000	-5.5219	-3.0781
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.566	0.26557	0.073	-3.2437	0.1117
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-0.668	0.16651	0.425	-1.694	0.358
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-5.76600*	0.1629	0.000	-6.8012	-4.7308
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-2.36600*	0.16984	0.000	-3.3888	-1.3432
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-0.9	0.15421	0.129	-1.9926	0.1926
6 AWPC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-50.63000*	1.13083	**0.000**	-61.694	-39.5656
	2 OWPC + L/P 0.30	-44.93000*	0.80236	**0.000**	-52.368	-37.4916
	3 OWPC + L/P 0.27	-21.83000*	1.10398	**0.003**	-32.602	-11.0582
	4 AWPC + L/P 0.33	-4.29800*	0.19265	0.000	-5.5886	-3.0074
	5 AWPC + L/P 0.30	-1.30000*	0.21948	0.042	-2.5635	-0.0365
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-4.96600*	0.19959	0.000	-6.2236	-3.7084
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-1.80000*	0.1859	0.012	-3.1533	-0.4467
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-1.368	0.17468	0.089	-2.9426	0.2066
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-5.60000*	0.23488	0.000	-6.9255	-4.2745
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-2.86600*	0.28269	0.001	-4.5303	-1.2017

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	Upper Bound
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-2.86600*	0.28269	0.001	-4.5303	-1.2017
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-1.96800*	0.19265	0.005	-3.2586	-0.6774
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-7.06600*	0.18954	0.000	-8.3809	-5.7511
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-3.66600*	0.19554	0.000	-4.9396	-2.3924
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-2.20000*	0.18213	0.006	-3.6072	-0.7928
7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	-45.6640*	1.12297	**0.000**	-57.043	-34.285
	2 OWPC + L/P 0.30	-39.9600*	0.79124	**0.000**	-47.801	-32.1272
	3 OWPC + L/P 0.27	-16.8640*	1.09593	**0.010**	-27.956	-5.7716
	4 AWPC + L/P 0.33	0.668	0.13925	0.140	-0.1256	1.4616
	5 AWPC + L/P 0.30	3.66600*	0.17449	0.000	2.6406	4.6914
	6 AWPC + L/P 0.27	4.96600*	0.19959	0.000	3.7084	6.2236
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	3.16600*	0.12975	0.000	2.3935	3.9385
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	3.59800*	0.11309	0.000	2.7292	4.4668
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-0.634	0.19351	0.772	-1.8323	0.5643
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	2.10000*	0.24938	0.022	0.3146	3.8854
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	2.99800*	0.13925	0.000	2.2044	3.7916
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.10000*	0.13491	0.000	-2.8802	-1.3198
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	1.30000*	0.14322	0.002	0.4899	2.1101
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	2.76600*	0.12428	0.000	1.9882	3.5438
8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-48.8300*	1.12062	**0.000**	-60.309	-37.3508

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	2 OWPC + L/P 0.30	-43.1300*	0.7879	**0.000**	-51.103	-35.1575
	3 OWPC + L/P 0.27	-20.0300*	1.09352	**0.005**	-31.225	-8.8351
	4 AWPC + L/P 0.33	-2.4980*	0.1188	0.000	-3.18	-1.816
	5 AWPC + L/P 0.30	0.5	0.15865	0.866	-0.5559	1.5559
	6 AWPC + L/P 0.27	1.80000*	0.1859	0.012	0.4467	3.1533
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-3.16600*	0.12975	0.000	-3.9385	-2.3935
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	0.432	0.08668	0.212	-0.1441	1.0081
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-3.80000*	0.17936	0.000	-5.0804	-2.5196
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.066	0.23857	0.519	-3.0206	0.8886
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-0.168	0.1188	1.000	-0.85	0.514
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-5.26600*	0.11369	0.000	-5.9109	-4.6211
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.86600*	0.12343	0.000	-2.5846	-1.1474
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-0.4	0.10085	0.364	-0.9744	0.1744
9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-49.26200*	1.11881	**0.000**	-60.82	-37.7037
	2 OWPC + L/P 0.30	-43.56200*	0.78532	**0.000**	-51.645	-35.4794
	3 OWPC + L/P 0.27	-20.46200*	1.09167	**0.005**	-31.738	-9.1862
	4 AWPC + L/P 0.33	-2.93000*	0.10034	0.000	-3.6546	-2.2054
	5 AWPC + L/P 0.30	0.068	0.14534	1.000	-1.1714	1.3074
	6 AWPC + L/P 0.27	1.368	0.17468	0.089	-0.2066	2.9426
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-3.59800*	0.11309	0.000	-4.4668	-2.7292
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-0.432	0.08668	0.212	-1.0081	0.1441
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-4.23200*	0.1677	0.001	-5.7272	-2.7368

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-0.6	0.10034	0.124	-1.3246	0.1246
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-5.69800*	0.09423	0.000	-6.3552	-5.0408
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-2.29800*	0.10578	0.000	-3.0837	-1.5123
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.83200*	0.07826	0.002	-1.3223	-0.3417
10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	-45.03000*	1.12977	**0.000**	-56.135	-33.9251
	2 OWPC + L/P 0.30	-39.33000*	0.80087	**0.000**	-46.817	-31.8426
	3 OWPC + L/P 0.27	-16.23000*	1.1029	**0.010**	-27.043	-5.417
	4 AWPC + L/P 0.33	1.30200*	0.18634	0.036	0.0776	2.5264
	5 AWPC + L/P 0.30	4.30000*	0.21396	0.000	3.0781	5.5219
	6 AWPC + L/P 0.27	5.60000*	0.23488	0.000	4.2745	6.9255
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	0.634	0.19351	0.772	-0.5643	1.8323
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	3.80000*	0.17936	0.000	2.5196	5.0804
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	4.23200*	0.1677	0.001	2.7368	5.7272
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	2.73400*	0.27843	0.002	1.0729	4.3951
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	3.63200*	0.18634	0.000	2.4076	4.8564
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-1.46600*	0.18313	0.021	-2.7116	-0.2204
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	1.93400*	0.18933	0.003	0.7236	3.1444
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	3.40000*	0.17544	0.000	2.069	4.731
11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-47.76400*	1.14067	**0.000**	-58.475	-37.0527
	2 OWPC + L/P 0.30	-42.06400*	0.81617	**0.000**	-49.103	-35.0246
	3 OWPC + L/P 0.27	-18.96400*	1.11406	**0.004**	-29.378	-8.5498
	4 AWPC + L/P 0.33	-1.432	0.24386	0.164	-3.2902	0.4262
	5 AWPC + L/P 0.30	1.566	0.26557	0.073	-0.1117	3.2437
	6 AWPC + L/P 0.27	2.86600*	0.28269	0.001	1.2017	4.5303
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-2.10000*	0.24938	0.022	-3.8854	-0.3146

continue

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1.066	0.23857	0.519	-0.8886	3.0206
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	1.498	0.22993	0.213	-0.6953	3.6913
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-2.7340*	0.27843	0.002	-4.3951	-1.0729
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	0.898	0.24386	0.746	-0.9602	2.7562
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-4.2000*	0.24142	0.001	-6.0991	-2.3009
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-0.8	0.24615	0.882	-2.625	1.025
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	0.666	0.23564	0.986	-1.3564	2.6884
12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-48.662*	1.12175	**0.000**	-60.092	-37.2317
	2 OWPC + L/P 0.30	-42.962*	0.78952	**0.000**	-50.868	-35.0563
	3 OWPC + L/P 0.27	-19.862*	1.09468	**0.005**	-31.007	-8.7172
	4 AWPC + L/P 0.33	-2.330*	0.1291	0.000	-3.0578	-1.6022
	5 AWPC + L/P 0.30	0.668	0.16651	0.425	-0.358	1.694
	6 AWPC + L/P 0.27	1.96800*	0.19265	0.005	0.6774	3.2586
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-2.9980*	0.13925	0.000	-3.7916	-2.2044
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	0.168	0.1188	1.000	-0.514	0.85
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	0.6	0.10034	0.124	-0.1246	1.3246
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-3.632*	0.18634	0.000	-4.8564	-2.4076
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-0.898	0.24386	0.746	-2.7562	0.9602
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-5.098*	0.12442	0.000	-5.8017	-4.3943
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.698*	0.13338	0.000	-2.4516	-0.9444
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-0.232	0.1128	1.000	-0.9028	0.4388
13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	-43.564*	1.12123	**0.000**	-55.017	-32.111
	2 OWPC + L/P 0.30	-37.864*	0.78876	**0.000**	-45.801	-29.9275
	3 OWPC + L/P 0.27	-14.764*	1.09414	**0.017**	-25.932	-3.596
	4 AWPC + L/P 0.33	2.7680*	0.12442	0.000	2.0643	3.4717
	5 AWPC + L/P 0.30	5.7660*	0.1629	0.000	4.7308	6.8012
	6 AWPC + L/P 0.27	7.0660*	0.18954	0.000	5.7511	8.3809

continue

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	2.10000*	0.13491	0.000	1.3198	2.8802
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	5.26600*	0.11369	0.000	4.6211	5.9109
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	5.69800*	0.09423	0.000	5.0408	6.3552
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	1.46600*	0.18313	0.021	0.2204	2.7116
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	4.20000*	0.24142	0.001	2.3009	6.0991
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	5.09800*	0.12442	0.000	4.3943	5.8017
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	3.40000*	0.12885	0.000	2.6658	4.1342
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	4.86600*	0.10741	0.000	4.2411	5.4909
14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-46.96400*	1.12225	**0.000**	-58.373	-35.5549
	2 OWPC + L/P 0.30	-41.26400*	0.79023	**0.000**	-49.141	-33.387
	3 OWPC + L/P 0.27	-18.16400*	1.0952	**0.007**	-29.287	-7.0409
	4 AWPC + L/P 0.33	-0.632	0.13338	0.144	-1.3856	0.1216
	5 AWPC + L/P 0.30	2.36600*	0.16984	0.000	1.3432	3.3888
	6 AWPC + L/P 0.27	3.66600*	0.19554	0.000	2.3924	4.9396
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-1.30000*	0.14322	0.002	-2.1101	-0.4899
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1.86600*	0.12343	0.000	1.1474	2.5846
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	2.29800*	0.10578	0.000	1.5123	3.0837
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.93400*	0.18933	0.003	-3.1444	-0.7236
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	0.8	0.24615	0.882	-1.025	2.625
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	1.69800*	0.13338	0.000	0.9444	2.4516
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-3.40000*	0.12885	0.000	-4.1342	-2.6658
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	1.46600*	0.11767	0.000	0.7512	2.1808
15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-48.43000*	1.12	**0.000**	-59.936	-36.9238
	2 OWPC + L/P 0.30	-42.73000*	0.78701	**0.000**	-50.74	-34.7203
	3 OWPC + L/P 0.27	-19.63000*	1.09288	**0.006**	-30.852	-8.4076

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	4 AWPC + L/P 0.33	-2.09800*	0.1128	0.000	-2.7688	-1.4272
	5 AWPC + L/P 0.30	0.9	0.15421	0.129	-0.1926	1.9926
	6 AWPC + L/P 0.27	2.20000*	0.18213	0.006	0.7928	3.6072
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-2.76600*	0.12428	0.000	-3.5438	-1.9882
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	0.4	0.10085	0.364	-0.1744	0.9744
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.83200*	0.07826	0.002	0.3417	1.3223
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-3.40000*	0.17544	0.000	-4.731	-2.069
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-0.666	0.23564	0.986	-2.6884	1.3564
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	0.232	0.1128	1.000	-0.4388	0.9028
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-4.86600*	0.10741	0.000	-5.4909	-4.2411
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.46600*	0.11767	0.000	-2.1808	-0.7512

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

1.2 การศึกษาคุณสมบัติการการไหลแผ่

1.2.1 ข้อมูลดิบแสดงระยะทางไหลแผ่

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	ระยะทางไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
1	OWPC + distilled	0.33	1	7.420
			2	7.685
			3	7.620
			4	7.520
			5	7.540
2	OWPC + distilled	0.30	1	7.415
			2	7.380

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	ระยะทางไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
2			3	7.005
			4	6.985
			5	7.270
3	OWPC + distilled	0.27	1	6.660
			2	6.810
			3	7.035
			4	6.745
			5	6.805
			1	7.920
			2	7.90
			3	7.710
			4	7.765
			5	7.795
4	AWPC + distilled	0.33	1	7.920
			2	7.90
			3	7.710
			4	7.765
			5	7.795
5	AWPC + distilled	0.30	1	7.515
			2	7.390
			3	7.450
			4	7.415

continue

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	ระยะทางไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
5			5	7.365
6	AWPC + distilled	0.27	1	7.015
			2	6.855
			3	7.230
			4	6.735
			5	6.905
7	AWPC + 1.2%PC	0.33	1	8.955
			2	8.625
			3	8.660
			4	8.700
			5	8.625
8	AWPC + 1.2%PC	0.30	1	7.930
			2	8.100
			3	7.890
			4	7.790
			5	7.960
9	AWPC + 1.2%PC	0.27	1	7.720
			2	7.895
			3	7.665
			4	7.735
			5	7.640

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	ระยะทางไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
10	AWPC + 1.8%PC	0.33	1	8.920
			2	9.215
			3	9.130
			4	9.065
			5	8.655
11	AWPC + 1.8%PC	0.30	1	8.615
			2	8.875
			3	8.960
			4	8.700
			5	8.320
12	AWPC + 1.8%PC	0.27	1	8.125
			2	8.270
			3	8.230
			4	8.480
			5	8.065
13	AWPC + 2.4%PC	0.33	1	9.420
			2	10.055
			3	9.635
			4	9.780
			5	9.570

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่	วัสดุ	L/P ratio	ชิ้นที่	ระยะทางไหลแผ่ (มิลลิเมตร)
14	AWPC + 2.4%PC	0.30	1	9.265
			2	9.150
			3	9.200
			4	8.890
			5	8.855
15	AWPC + 2.4%PC	0.27	1	8.345
			2	8.155
			3	8.130
			4	8.500
			5	8.415

1.2.2 แสดงข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาระยะทางการไหลแผ่

Descriptive Statistics

Material	L/P_Ratio	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
1 OWPC	1 L/P=0.33	5	7.557	0.10097	7.42	7.685
	2 L/P=0.30	5	7.211	0.204432	6.985	7.415
	3 L/P=0.27	5	6.811	0.139077	6.66	7.035
2 AWPC+distilled	1 L/P=0.33	5	7.818	0.089624	7.71	7.92
	2 L/P=0.30	5	7.427	0.058374	7.365	7.515
	3 L/P=0.27	5	6.948	0.187003	6.735	7.23
3 AWPC+1.2%PC	1 L/P=0.33	5	8.713	0.138771	8.625	8.955
	2 L/P=0.30	5	7.934	0.112827	7.79	8.1
	3 L/P=0.27	5	7.731	0.099587	7.64	7.895
4 AWPC+1.8%PC	1 L/P=0.33	5	8.997	0.219505	8.655	9.215
	2 L/P=0.30	5	8.694	0.249835	8.32	8.96
	3 L/P=0.27	5	8.234	0.159898	8.065	8.48
5 AWPC+2.4%PC	1 L/P=0.33	5	9.692	0.24064	9.42	10.055
	2 L/P=0.30	5	9.072	0.187036	8.855	9.265
	3 L/P=0.27	5	8.309	0.161841	8.13	8.5

1.2.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล

Material	L/P_Ratio			Flow
OWPC	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	7.557
			Std. Deviation	0.10097
		Most Extreme Differences	Absolute	0.167
			Positive	0.167
			Negative	-0.157
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.373
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.999
	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	7.211
			Std. Deviation	0.204432
		Most Extreme Differences	Absolute	0.243
			Positive	0.243
			Negative	-0.214
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.544
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.929
	L/P=0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	6.811
			Std. Deviation	0.139077
		Most Extreme Differences	Absolute	0.303
			Positive	0.303
			Negative	-0.146
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.677
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.749
AWPC	L/P=0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	7.818
			Std. Deviation	0.089624
		Most Extreme Differences	Absolute	0.22
			Positive	0.201
			Negative	-0.22
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.492
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.969
	L/P=0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	7.427
			Std. Deviation	0.058374
		Most Extreme Differences	Absolute	0.181
			Positive	0.181
			Negative	-0.144

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material	L/P_Ratio			Flow
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.406
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.997
	0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	
			Std. Deviation	
		Most Extreme Differences	Absolute	
			Positive	
			Negative	
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.427
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.993
AWPC + 1.2%PC	0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	
			Std. Deviation	
		Most Extreme Differences	Absolute	
			Positive	
			Negative	
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.754
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.62
	0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	
			Std. Deviation	
		Most Extreme Differences	Absolute	
			Positive	
			Negative	
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.467
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.981
	0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	
			Std. Deviation	
		Most Extreme Differences	Absolute	
			Positive	
			Negative	
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.635
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.815
AWPC + 1.8%PC	0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	8.997
			Std. Deviation	0.219505
		Most Extreme Differences	Absolute	0.222
			Positive	0.16
			Negative	-0.222

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material	L/P_Ratio			Flow
		Most Extreme Differences	Absolute	0.222
			Positive	0.16
			Negative	-0.222
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.496
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.967
	0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	8.694
			Std. Deviation	0.249835
		Most Extreme Differences	Absolute	0.176
			Positive	0.144
			Negative	-0.176
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.393
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.998
	0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	8.234
			Std. Deviation	0.159898
		Most Extreme Differences	Absolute	0.211
			Positive	0.211
			Negative	-0.145
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.472
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.979
AWPC + 2.4%PC	0.33	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	9.692
			Std. Deviation	0.24064
		Most Extreme Differences	Absolute	0.194
			Positive	0.194
			Negative	-0.134
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.433
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.992
	0.30	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	9.072
			Std. Deviation	0.187036
		Most Extreme Differences	Absolute	0.262
			Positive	0.235
			Negative	-0.262
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.585
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.883
	0.27	N		5
		Normal Parameters[a]	Mean	8.309
			Std. Deviation	0.161841

continue

Material	L/P Ratio			Flow
		Most Extreme Differences	Absolute	0.229
			Positive	0.229
			Negative	-0.188
		Kolmogorov-Smirnov Z		0.513
		Asymp. Sig. (2-tailed)		0.955

1.2.4 แสดงการวิเคราะห์ระยะทางไหลแผ่ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:Flow

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	49.179[a]	14	3.513	127.000	.000
Intercept	4892.279	1	4892.279	176874.124	.000
Material	36.925	4	9.231	333.740	.000
L/P_Ratio	11.256	2	5.628	203.469	.000
Material * L/P_Ratio	.999	8	.125	4.513	.000
Error	1.660	60	.028		
Total	4943.118	75			
Corrected Total	50.839	74			

a. R Squared = .967 (Adjusted R Squared = .960)

Test of Homogeneity of Variances

Flow

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.417	14	60	.174

ANOVA

Flow

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	49.179	14	3.513	127.000	.000
Within Groups	1.660	60	.028		
Total	50.839	74			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Multiple Comparisons

Bonferroni

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
1 OWPC + L/P 0.33	2 OWPC + L/P 0.30	.346000	.105185	.177	-.04276	.73476
	3 OWPC + L/P 0.27	.746000*	.105185	.000	.35724	1.13476
	4 AWPC + L/P 0.33	-.261000	.105185	1.000	-.64976	.12776
	5 AWPC + L/P 0.30	.130000	.105185	1.000	-.25876	.51876
	6 AWPC + L/P 0.27	.609000*	.105185	.000	.22024	.99776
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-1.156000*	.105185	.000	-1.54476	-.76724
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-.377000	.105185	.071	-.76576	.01176
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-.174000	.105185	1.000	-.56276	.21476
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.440000*	.105185	.000	-1.82876	-1.05124
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.137000*	.105185	.000	-1.52576	-.74824
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-.677000*	.105185	.000	-1.06576	-.28824
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.135000*	.105185	.000	-2.52376	-1.74624
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.515000*	.105185	.000	-1.90376	-1.12624
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.752000*	.105185	.000	-1.14076	-.36324
2 OWPC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-.346000	.105185	.177	-.73476	.04276
	3 OWPC + L/P 0.27	.400000*	.105185	.035	.01124	.78876
	4 AWPC + L/P 0.33	-.607000*	.105185	.000	-.99576	-.21824
	5 AWPC + L/P 0.30	-.216000	.105185	1.000	-.60476	.17276
	6 AWPC + L/P 0.27	.263000	.105185	1.000	-.12576	.65176
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-1.502000*	.105185	.000	-1.89076	-1.11324
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-.723000*	.105185	.000	-1.11176	-.33424
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-.520000*	.105185	.001	-.90876	-.13124
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.786000*	.105185	.000	-2.17476	-1.39724
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.483000*	.105185	.000	-1.87176	-1.09424
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-1.023000*	.105185	.000	-1.41176	-.63424
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.481000*	.105185	.000	-2.86976	-2.09224
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.861000*	.105185	.000	-2.24976	-1.47224
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-1.098000*	.105185	.000	-1.48676	-.70924
3 OWPC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-.746000*	.105185	.000	-1.13476	-.35724
	2 OWPC + L/P 0.30	-.400000*	.105185	.035	-.78876	-.01124
	4 AWPC + L/P 0.33	-1.007000*	.105185	.000	-1.39576	-.61824
	5 AWPC + L/P 0.30	-.616000*	.105185	.000	-1.00476	-.22724
	6 AWPC + L/P 0.27	-.137000	.105185	1.000	-.52576	.25176

continue

	(J) group	Mean	Std.	Sig.	95% Confidence Interval

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-1.902000*	.105185	.000	-2.29076	-1.51324
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-1.123000*	.105185	.000	-1.51176	-.73424
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-.920000*	.105185	.000	-1.30876	-.53124
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-2.186000*	.105185	.000	-2.57476	-1.79724
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.883000*	.105185	.000	-2.27176	-1.49424
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-1.423000*	.105185	.000	-1.81176	-1.03424
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.881000*	.105185	.000	-3.26976	-2.49224
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-2.261000*	.105185	.000	-2.64976	-1.87224
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-1.498000*	.105185	.000	-1.88676	-1.10924
4 AWPC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	.261000	.105185	1.000	-.12776	.64976
	2 OWPC + L/P 0.30	.607000*	.105185	**.000**	.21824	.99576
	3 OWPC + L/P 0.27	1.007000*	.105185	**.000**	.61824	1.39576
	5 AWPC + L/P 0.30	.391000*	.105185	.047	.00224	.77976
	6 AWPC + L/P 0.27	.870000*	.105185	.000	.48124	1.25876
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-.895000*	.105185	.000	-1.28376	-.50624
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-.116000	.105185	1.000	-.50476	.27276
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.087000	.105185	1.000	-.30176	.47576
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.179000*	.105185	.000	-1.56776	-.79024
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-.876000*	.105185	.000	-1.26476	-.48724
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-.416000*	.105185	.022	-.80476	-.02724
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-1.874000*	.105185	.000	-2.26276	-1.48524
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.254000*	.105185	.000	-1.64276	-.86524
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.491000*	.105185	.002	-.87976	-.10224
5 AWPC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	-.130000	.105185	1.000	-.51876	.25876
	2 OWPC + L/P 0.30	.216000	.105185	1.000	-.17276	.60476
	3 OWPC + L/P 0.27	.616000*	.105185	**.000**	.22724	1.00476
	4 AWPC + L/P 0.33	-.391000*	.105185	.047	-.77976	-.00224
	6 AWPC + L/P 0.27	.479000*	.105185	.003	.09024	.86776
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-1.286000*	.105185	.000	-1.67476	-.89724
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-.507000*	.105185	.001	-.89576	-.11824
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-.304000	.105185	.562	-.69276	.08476
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.570000*	.105185	.000	-1.95876	-1.18124
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.267000*	.105185	.000	-1.65576	-.87824
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-.807000*	.105185	.000	-1.19576	-.41824

Continue

(I) group		Difference	Error		Lower Bound	Upper Bound
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.265000*	.105185	.000	-2.65376	-1.87624
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.645000*	.105185	.000	-2.03376	-1.25624
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.882000*	.105185	.000	-1.27076	-.49324
6 AWPC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	-.609000*	.105185	**.000**	-.99776	-.22024
	2 OWPC + L/P 0.30	-.263000	.105185	1.000	-.65176	.12576
	3 OWPC + L/P 0.27	.137000	.105185	1.000	-.25176	.52576
	4 AWPC + L/P 0.33	-.870000*	.105185	.000	-1.25876	-.48124
	5 AWPC + L/P 0.30	-.479000*	.105185	.003	-.86776	-.09024
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-1.765000*	.105185	.000	-2.15376	-1.37624
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-.986000*	.105185	.000	-1.37476	-.59724
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	-.783000*	.105185	.000	-1.17176	-.39424
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-2.049000*	.105185	.000	-2.43776	-1.66024
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-1.746000*	.105185	.000	-2.13476	-1.35724
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-1.286000*	.105185	.000	-1.67476	-.89724
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-2.744000*	.105185	.000	-3.13276	-2.35524
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-2.124000*	.105185	.000	-2.51276	-1.73524
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-1.361000*	.105185	.000	-1.74976	-.97224
7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	1.156000*	.105185	**.000**	.76724	1.54476
	2 OWPC + L/P 0.30	1.502000*	.105185	**.000**	1.11324	1.89076
	3 OWPC + L/P 0.27	1.902000*	.105185	**.000**	1.51324	2.29076
	4 AWPC + L/P 0.33	.895000*	.105185	.000	.50624	1.28376
	5 AWPC + L/P 0.30	1.286000*	.105185	.000	.89724	1.67476
	6 AWPC + L/P 0.27	1.765000*	.105185	.000	1.37624	2.15376
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	.779000*	.105185	.000	.39024	1.16776
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.982000*	.105185	.000	.59324	1.37076
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-.284000	.105185	.945	-.67276	.10476
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	.019000	.105185	1.000	-.36976	.40776
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	.479000*	.105185	.003	.09024	.86776
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-.979000*	.105185	.000	-1.36776	-.59024
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-.359000	.105185	.121	-.74776	.02976
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	.404000*	.105185	.031	.01524	.79276
8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	.377000	.105185	.071	-.01176	.76576

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	Upper Bound
	2 OWPC + L/P 0.30	.723000*	.105185	**.000**	.33424	1.11176
	3 OWPC + L/P 0.27	1.123000*	.105185	**.000**	.73424	1.51176
	4 AWPC + L/P 0.33	.116000	.105185	1.000	-.27276	.50476
	5 AWPC + L/P 0.30	.507000*	.105185	.001	.11824	.89576
	6 AWPC + L/P 0.27	.986000*	.105185	.000	.59724	1.37476
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-.779000*	.105185	.000	-1.16776	-.39024
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.203000	.105185	1.000	-.18576	.59176
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.063000*	.105185	.000	-1.45176	-.67424
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-.760000*	.105185	.000	-1.14876	-.37124
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-.300000	.105185	.625	-.68876	.08876
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-1.758000*	.105185	.000	-2.14676	-1.36924
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.138000*	.105185	.000	-1.52676	-.74924
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.375000	.105185	.076	-.76376	.01376
9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	.174000	.105185	1.000	-.21476	.56276
	2 OWPC + L/P 0.30	.520000*	.105185	**.001**	.13124	.90876
	3 OWPC + L/P 0.27	.920000*	.105185	**.000**	.53124	1.30876
	4 AWPC + L/P 0.33	-.087000	.105185	1.000	-.47576	.30176
	5 AWPC + L/P 0.30	.304000	.105185	.562	-.08476	.69276
	6 AWPC + L/P 0.27	.783000*	.105185	.000	.39424	1.17176
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-.982000*	.105185	.000	-1.37076	-.59324
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	-.203000	.105185	1.000	-.59176	.18576
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-1.266000*	.105185	.000	-1.65476	-.87724
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-.963000*	.105185	.000	-1.35176	-.57424
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	-.503000*	.105185	.001	-.89176	-.11424
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-1.961000*	.105185	.000	-2.34976	-1.57224
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-1.341000*	.105185	.000	-1.72976	-.95224
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.578000*	.105185	.000	-.96676	-.18924
10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	1.440000*	.105185	**.000**	1.05124	1.82876
	2 OWPC + L/P 0.30	1.786000*	.105185	**.000**	1.39724	2.17476
	3 OWPC + L/P 0.27	2.186000*	.105185	**.000**	1.79724	2.57476
	4 AWPC + L/P 0.33	1.179000*	.105185	.000	.79024	1.56776
	5 AWPC + L/P 0.30	1.570000*	.105185	.000	1.18124	1.95876
	6 AWPC + L/P 0.27	2.049000*	.105185	.000	1.66024	2.43776
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	.284000	.105185	.945	-.10476	.67276
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1.063000*	.105185	.000	.67424	1.45176
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	1.266000*	.105185	.000	.87724	1.65476
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	.303000	.105185	.577	-.08576	.69176
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	.763000*	.105185	.000	.37424	1.15176
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-.695000*	.105185	.000	-1.08376	-.30624
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-.075000	.105185	1.000	-.46376	.31376
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	.688000*	.105185	.000	.29924	1.07676
						continue

	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval

(I) group	(J) group	Mean Difference	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	Upper Bound
11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	1.137000*	.105185	**.000**	.74824	1.52576
	2 OWPC + L/P 0.30	1.483000*	.105185	**.000**	1.09424	1.87176
	3 OWPC + L/P 0.27	1.883000*	.105185	**.000**	1.49424	2.27176
	4 AWPC + L/P 0.33	.876000*	.105185	.000	.48724	1.26476
	5 AWPC + L/P 0.30	1.267000*	.105185	.000	.87824	1.65576
	6 AWPC + L/P 0.27	1.746000*	.105185	.000	1.35724	2.13476
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-.019000	.105185	1.000	-.40776	.36976
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	.760000*	.105185	.000	.37124	1.14876
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.963000*	.105185	.000	.57424	1.35176
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-.303000	.105185	.577	-.69176	.08576
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	.460000*	.105185	.005	.07124	.84876
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-.998000*	.105185	.000	-1.38676	-.60924
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-.378000	.105185	.069	-.76676	.01076
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	.385000	.105185	.056	-.00376	.77376
12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	.677000*	.105185	**.000**	.28824	1.06576
	2 OWPC + L/P 0.30	1.023000*	.105185	**.000**	.63424	1.41176
	3 OWPC + L/P 0.27	1.423000*	.105185	**.000**	1.03424	1.81176
	4 AWPC + L/P 0.33	.416000*	.105185	.022	.02724	.80476
	5 AWPC + L/P 0.30	.807000*	.105185	.000	.41824	1.19576
	6 AWPC + L/P 0.27	1.286000*	.105185	.000	.89724	1.67476
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-.479000*	.105185	.003	-.86776	-.09024
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	.300000	.105185	.625	-.08876	.68876
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.503000*	.105185	.001	.11424	.89176
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-.763000*	.105185	.000	-1.15176	-.37424
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-.460000*	.105185	.005	-.84876	-.07124
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-1.458000*	.105185	.000	-1.84676	-1.06924
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-.838000*	.105185	.000	-1.22676	-.44924
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	-.075000	.105185	1.000	-.46376	.31376
13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	1 OWPC + L/P 0.33	2.135000*	.105185	**.000**	1.74624	2.52376
	2 OWPC + L/P 0.30	2.481000*	.105185	**.000**	2.09224	2.86976
	3 OWPC + L/P 0.27	2.881000*	.105185	**.000**	2.49224	3.26976
	4 AWPC + L/P 0.33	1.874000*	.105185	.000	1.48524	2.26276
	5 AWPC + L/P 0.30	2.265000*	.105185	.000	1.87624	2.65376
	6 AWPC + L/P 0.27	2.744000*	.105185	.000	2.35524	3.13276
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	.979000*	.105185	.000	.59024	1.36776
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1.758000*	.105185	.000	1.36924	2.14676
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	1.961000*	.105185	.000	1.57224	2.34976
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	.695000*	.105185	.000	.30624	1.08376

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(I) group					Lower Bound	Upper Bound
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	.998000*	.105185	.000	.60924	1.38676
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	1.458000*	.105185	.000	1.06924	1.84676
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	.620000*	.105185	.000	.23124	1.00876
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	1.383000*	.105185	.000	.99424	1.77176
14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	1 OWPC + L/P 0.33	1.515000*	.105185	**.000**	1.12624	1.90376
	2 OWPC + L/P 0.30	1.861000*	.105185	**.000**	1.47224	2.24976
	3 OWPC + L/P 0.27	2.261000*	.105185	**.000**	1.87224	2.64976
	4 AWPC + L/P 0.33	1.254000*	.105185	.000	.86524	1.64276
	5 AWPC + L/P 0.30	1.645000*	.105185	.000	1.25624	2.03376
	6 AWPC + L/P 0.27	2.124000*	.105185	.000	1.73524	2.51276
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	.359000	.105185	.121	-.02976	.74776
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	1.138000*	.105185	.000	.74924	1.52676
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	1.341000*	.105185	.000	.95224	1.72976
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	.075000	.105185	1.000	-.31376	.46376
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	.378000	.105185	.069	-.01076	.76676
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	.838000*	.105185	.000	.44924	1.22676
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-.620000*	.105185	.000	-1.00876	-.23124
	15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	.763000*	.105185	.000	.37424	1.15176
15 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.27	1 OWPC + L/P 0.33	.752000*	.105185	**.000**	.36324	1.14076
	2 OWPC + L/P 0.30	1.098000*	.105185	**.000**	.70924	1.48676
	3 OWPC + L/P 0.27	1.498000*	.105185	**.000**	1.10924	1.88676
	4 AWPC + L/P 0.33	.491000*	.105185	.002	.10224	.87976
	5 AWPC + L/P 0.30	.882000*	.105185	.000	.49324	1.27076
	6 AWPC + L/P 0.27	1.361000*	.105185	.000	.97224	1.74976
	7 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.33	-.404000*	.105185	.031	-.79276	-.01524
	8 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.30	.375000	.105185	.076	-.01376	.76376
	9 AWPC + 1.2%PC + L/P 0.27	.578000*	.105185	.000	.18924	.96676
	10 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.33	-.688000*	.105185	.000	-1.07676	-.29924
	11 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.30	-.385000	.105185	.056	-.77376	.00376
	12 AWPC + 1.8%PC + L/P 0.27	.075000	.105185	1.000	-.31376	.46376
	13 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.33	-1.383000*	.105185	.000	-1.77176	-.99424
	14 AWPC + 2.4%PC + L/P 0.30	-.763000*	.105185	.000	-1.15176	-.37424

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตอนที่ 2 : การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ

2.1 การศึกษาเวลาแข็งตัว

2.1.2 ข้อมูลดิบแสดงเวลาการแข็งตัว

วัสดุ	ชิ้นที่	เวลาแข็งตัว (นาที)
MTA + distilled water	1	79.33
	2	85.33
	3	81.33
	4	77.33
	5	84.33
OWPC + distilled water	1	48.33
	2	50.33
	3	51.33
	4	46.83
	5	48.83
	6	46.83
	7	52.33
	8	51.83
	9	47.33
	10	48.83

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัสดุ	ชิ้นที่	เวลาแข็งตัว (นาที)
AWPC + 1.8% PC	1	6.83
	2	6.67
	3	7.83
	4	7.33
	5	6.67
	6	6.67
	7	7.17
	8	7.67
	9	6.67
	10	6.83

2.1.2 แสดงข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาเวลาแข็งตัว

Descriptive Statistics

Material	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
1 MTA	5	81.53000	3.346640	77.330	85.330
2 OWPC+distilled water	10	49.28000	2.060879	46.830	52.330
3 AWPC+1.8%PC	10	7.03400	.441895	6.670	7.830

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Material			Setting_time
1 MTA	N		5
	Normal Parameters[a]	Mean	81.53000
		Std. Deviation	3.346640
	Most Extreme Differences	Absolute	.199
		Positive	.145
		Negative	-.199
	Kolmogorov-Smirnov Z		.444
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.989
2 OWPC+distilled water	N		10
	Normal Parameters[a]	Mean	49.28000
		Std. Deviation	2.060879
	Most Extreme Differences	Absolute	.186
		Positive	.186
		Negative	-.140
	Kolmogorov-Smirnov Z		.590
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.878
3 AWPC+1.8%PC	N		10
	Normal Parameters[a]	Mean	7.03400
		Std. Deviation	.441895
	Most Extreme Differences	Absolute	.278
		Positive	.278
		Negative	-.205
	Kolmogorov-Smirnov Z		.879
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.423

2.1.4 แสดงการวิเคราะห์เวลาแข็งตัวด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

Test of Homogeneity of Variances

Setting_time

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
11.668	2	22	.000

ANOVA

Setting_time

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	20318.331	2	10159.166	2636.178	.000
Within Groups	84.782	22	3.854		
Total	20403.114	24			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Robust Tests of Equality of Means

Setting_time

	Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	1747.739	2	6.500	.000

a. Asymptotically F distributed.

Multiple Comparisons

Tamhane

(I) Material	(J) Material	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
1 MTA	2 OWPC+distilled water	32.250000*	1.632398	.000	26.75776	37.74224
	3 AWPC+1.8%PC	74.496000*	1.503172	.000	68.63159	80.36041
2 OWPC+distilled water	1 MTA	-32.250000*	1.632398	.000	-37.74224	-26.75776
	3 AWPC+1.8%PC	42.246000*	.666520	.000	40.33308	44.15892
3 AWPC+1.8%PC	1 MTA	-74.496000*	1.503172	.000	-80.36041	-68.63159
	2 OWPC+distilled water	-42.246000*	.666520	.000	-44.15892	-40.33308

2.2 การศึกษาความทนแรงอัด

2.2.1 ข้อมูลดิบแสดงความทนแรงอัดวันที่ 1 และวันที่ 21 (เมกะปาสกาล)

วันที่ 1

วัสดุ	ชิ้นที่	ความทนแรงอัดวันที่ 1 (MPa)
MTA + distilled water	1	46.588
	2	47.048
	3	48.868
	4	45.762
	5	57.805

continue

วัสดุ	ชิ้นที่	ความทนแรงอัดวันที่ 1 (MPa)
OWPC + distilled water	1	42.450
	2	43.327
	3	61.293
	4	62.866
	5	60.511
	6	50.243
	7	45.508
	8	49.970
	9	58.069
	10	47.187
AWPC + 1.8% PC	1	64.041
	2	65.225
	3	63.815
	4	52.364
	5	61.868
	6	50.467
	7	51.071
	8	62.901
	9	55.391
	10	57.805

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่ 21

วัสดุ	ชิ้นที่	ความทนแรงอัดวันที่ 21 (MPa)
MTA + distilled water	1	93.346
	2	92.912
	3	101.259
	4	93.319
	5	98.019
OWPC + distilled water	1	82.704
	2	77.443
	3	82.173
	4	74.106
	5	73.523
	6	72.587
	7	81.727
	8	77.344
	9	81.970
	10	73.908
AWPC + 1.8% PC	1	97.146
	2	104.476
	3	88.860
	4	80.961
	5	81.641
	6	90.683
	7	82.722
	8	77.332
	9	79.138
	10	92.232

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 แสดงข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาความทนแรงอัดวันที่ 1 และวันที่ 21

Descriptive Statistics

Material		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
1 MTA	Compressive_1day	5	49.214040	4.9353456	45.7619	57.8050
	Compressive_21days	5	95.770820	3.7159529	92.9122	101.2587
2 OWPC+distilled water	Compressive_1day	10	52.142390	7.8347189	42.4500	62.8661
	Compressive_21days	10	77.748510	4.0899213	72.5867	82.7037
3 AWPC+1.8%PC	Compressive_1day	10	58.494700	5.7966522	50.4672	65.2248
	Compressive_21days	10	87.519160	8.7483591	77.3323	104.4760

2.2.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Material			Compressive_1day	Compressive_21days
1 MTA	N		5	5
	Normal Parameters[a]	Mean	49.214040	95.770820
		Std. Deviation	4.9353456	3.7159529
	Most Extreme Differences	Absolute	.328	.343
		Positive	.328	.343
		Negative	-.242	-.221
	Kolmogorov-Smirnov Z		.733	.767
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.655	.599
2 OWPC+distilled water	N		10	10
	Normal Parameters[a]	Mean	52.142390	77.748510
		Std. Deviation	7.8347189	4.0899213
	Most Extreme Differences	Absolute	.196	.235
		Positive	.196	.213
		Negative	-.175	-.235
	Kolmogorov-Smirnov Z		.619	.742
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.838	.641
3 AWPC+1.8%PC	N		10	10
	Normal Parameters[a]	Mean	58.494700	87.519160
		Std. Deviation	5.7966522	8.7483591
	Most Extreme Differences	Absolute	.220	.208
		Positive	.155	.208
		Negative	-.220	-.122
	Kolmogorov-Smirnov Z		.695	.659
	Asymp. Sig. (2-tailed)		.720	.779

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.4 แสดงการวิเคราะห์เวลาแข็งตัวด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

Test of Homogeneity of Variances

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Compressive_1day	2.663	2	22	.092
Compressive_21days	4.524	2	22	.023

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Compressive_1day	Between Groups	350.819	2	175.410	4.052	.032
	Within Groups	952.287	22	43.286		
	Total	1303.106	24			
Compressive_21days	Between Groups	1167.650	2	583.825	14.358	.000
	Within Groups	894.584	22	40.663		
	Total	2062.234	24			

Robust Tests of Equality of Means

		Statistic[a]	df1	df2	Sig.
Compressive_1day	Brown-Forsythe	4.587	2	20.112	.023
Compressive_21days	Brown-Forsythe	17.427	2	16.266	.000

a. Asymptotically F distributed.

Multiple Comparisons

Compressive_1day
Scheffe

(I) Material	(J) Material	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
1 MTA	2 OWPC+distilled water	-2.9283500	3.6035712	.722	-12.385039	6.528339
	3 AWPC+1.8%PC	-9.2806600	3.6035712	.055	-18.737349	.176029
2 OWPC+distilled water	1 MTA	2.9283500	3.6035712	.722	-6.528339	12.385039
	3 AWPC+1.8%PC	-6.3523100	2.9423035	.121	-14.073664	1.369044
3 AWPC+1.8%PC	1 MTA	9.2806600	3.6035712	.055	-.176029	18.737349
	2 OWPC+distilled water	6.3523100	2.9423035	.121	-1.369044	14.073664

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Multiple Comparisons

Compressive_21days
Tamhane

(I) Material	(J) Material	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
1 MTA	2 OWPC+distilled water	18.0223100*	2.1058031	**.000**	11.847124	24.197496
	3 AWPC+1.8%PC	8.2516600	3.2272341	.070	-.592239	17.095559
2 OWPC+distilled water	1 MTA	-18.0223100*	2.1058031	**.000**	-24.197496	-11.847124
	3 AWPC+1.8%PC	-9.7706500*	3.0538704	**.021**	-18.152457	-1.388843
3 AWPC+1.8%PC	1 MTA	-8.2516600	3.2272341	.070	-17.095559	.592239
	2 OWPC+distilled water	9.7706500*	3.0538704	**.021**	1.388843	18.152457

*. The mean difference is significant at the 0.050 level.

2.3 การศึกษาอุณหภูมิขณะแข็งตัว (อุณหภูมิซีเมนต์ – อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม)

2.3.1 ข้อมูลแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะแข็งตัว

2.3.1.1 ข้อมูลดิบ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไวท์โปรรูทเอมทีเอ ผสมน้ำกลั่น (องศาเซลเซียส)

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5
2	1.3	1.5	0.5	0.9	0.4
4	0.1	0.6	1.0	0.6	0.5
6	1.3	0.8	0.5	0.3	0.3
8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.2
10	0.1	0.4	0.4	0.5	0.2
12	0.2	0.3	0.6	0.2	0.3
14	0.3	0.3	0.8	0.2	0.3
16	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
18	0.1	0.3	0.5	0.2	0.4
20	0.4	0.3	0.5	0.5	0.3
				continue	

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5
22	0.4	-0.1	0.1	0.2	0.3
24	-0.1	0	-0.1	0.4	0.1
26	0.4	-0.2	0.1	0.2	0.0
28	0.4	-0.4	0.2	0.2	0.2
30	0.1	0	0.1	-0.2	0.3
32	0.1	-0.2	0.0	0.0	-0.3
34	0.1	0.4	0.1	-0.2	-0.2
36	-0.2	-0.5	0.0	-0.3	-0.3
38	0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3
40	0.0	0.1	0.1	-0.2	-0.2
42	0.0	0.1	0.1	-0.2	-0.1
44	0.2	-0.1	-0.1	-0.3	0.1
46	-0.1	0.0	-0.1	0.1	-0.1
48	0.3	-0.1	0.1	-0.1	-0.1
50	0.3	0.1	-0.3	0.3	0.1
52	0.3	-0.2	-0.2	0.1	-0.1
54	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.0
56	0.1	-0.1	-0.5	-0.2	0.2
58	0.1	0.0	-0.2	-0.3	-0.3
60	-0.3	0.2	0.1	-0.2	-0.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น (องศาเซลเซียส)

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
2	1.0	0.6	1.0	1.2	0.9	1.1	1.1	0.8	0.9	1.0
4	0.8	0.4	0.4	0.4	1.0	1.0	0.8	0.8	0.6	0.5
6	0.9	0.6	0.2	0.4	0.8	1.2	0.7	0.7	0.4	0.6
8	0.9	0.5	0.4	0.6	0.7	0.6	0.4	0.8	0.4	0.5
10	0.9	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.6	0.3	0.4	0.5
12	0.6	0.5	0.4	0.7	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2
14	0.8	0.4	0.2	0.9	0.6	0.3	0.2	0.2	0.6	0.2
16	0.4	0	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.9	0.7
18	0.0	0.2	0.5	0.1	0.8	0.7	0.7	0.4	0.1	0.2
20	-0.1	0.1	0.9	0.9	0.1	0.1	0.3	0.1	0.5	0.4
22	0.7	0.4	0.7	0.7	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.6
24	0.1	0.4	1.0	1.0	0.6	0.5	0.0	-0.3	0.3	0.5
26	0.1	0.3	0.8	0.9	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3
28	0.5	0.3	0.7	0.8	0.5	0.2	-0.2	0.3	0.2	0.6
30	0.5	0.8	0.4	0.3	0.9	0.8	0.1	0.0	0.3	0.6
32	0.0	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
34	0.1	0.4	0.3	0.6	0.1	0.0	0.4	0.6	0.3	0.3
36	-0.2	0.6	0.4	0.3	0.2	-0.3	0.6	0.6	0.2	0.4
38	0.9	0.1	0.5	0.2	0.1	0.5	0.5	0.1	-0.1	0.0
40	-0.6	-0.4	0.4	0.2	-0.4	-0.6	-0.1	0.3	0.1	0.0
42	-0.6	-0.3	-0.2	0.7	-0.3	-0.4	-0.1	-0.6	-0.2	-0.2
44	-0.6	-0.3	0.5	0.1	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.1	-0.3
46	-0.6	-0.3	0.0	0.2	-0.2	-0.3	0.1	0.0	-0.1	-0.2
48	-0.8	-0.4	-0.1	-0.1	0.2	-0.4	-0.2	0.5	-0.3	-0.2

continue

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
50	0.0	-0.8	-0.3	0.0	-0.1	-0.2	0.2	0.5	-0.1	-0.2
52	-0.1	-0.7	0.2	-0.3	-0.6	0.1	-0.3	0.3	-0.3	-0.2
54	-0.1	-1.0	-0.2	-0.4	0.1	-0.7	-0.2	0.0	-0.3	-0.4
56	-1.0	-0.7	-0.6	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.4
58	-0.9	-1.1	-0.3	-0.3	0.0	-0.3	-0.1	0.0	-0.2	-0.6
60	-0.7	-0.7	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.2	-0.1	-0.3	-0.4

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมซุปเปอร์พลาสติ-ไซเซอร์ (องศาเซลเซียส)

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
2	0.8	-0.2	0.3	-0.4	1.3	0.3	0.4	0.5	0.2	0.2
4	0.6	0.2	0.2	-0.2	0.8	0.4	0.5	0.4	0.3	0.5
6	0.8	0.3	0.5	0.7	0.9	0.5	0.5	0.2	0.4	0.6
8	0.4	0.4	0.1	0	0.7	0.6	0.3	0.3	0.1	0.4
10	0.3	0.1	-0.2	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2
12	0.2	0.1	0.3	-0.1	0.6	0.3	0.1	-0.1	0.6	0.0
14	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	-0.2	0.0	0.3	0.6	0.4
16	-0.7	0.2	0.3	-0.4	0.6	0.1	-0.1	-0.3	-0.1	0.2
18	-0.9	0.0	-0.4	-0.1	0.4	0.0	0.0	-0.3	0.1	0.4
20	-0.2	-0.3	-0.1	-1.0	-0.5	-0.3	-0.3	-0.1	0.1	-0.2
22	-0.1	-0.1	-0.5	-0.5	-0.7	-0.4	-0.3	0.0	-0.3	-0.6
24	0.0	0.1	-0.8	-0.9	-0.4	-0.2	-0.5	-0.4	0.0	-0.2
26	-0.1	-0.2	-1.3	-0.5	-0.4	-0.3	-0.6	-0.3	-0.4	-0.3
28	-0.2	-0.8	-1.2	-0.3	-0.8	-0.4	-0.5	-0.2	-0.4	0.2
30	0.4	-0.2	-0.8	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.9

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
32	0.0	-0.6	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.1	-0.8	0.4
34	-0.7	-0.6	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.7	-0.6	-0.6
36	-0.5	-1.0	-0.3	-0.7	-0.8	-0.3	-0.5	-0.6	-0.4	-0.5
38	-0.1	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.8	-0.8	-0.3	-0.3	0.0
40	-0.4	-0.2	-0.8	-0.6	-0.4	-0.7	-0.8	-0.1	-0.1	-0.4
42	-0.5	-0.4	-0.8	-0.7	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.5	-0.2
44	-0.6	-0.3	-0.8	-0.8	-0.5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.7
46	-0.5	-0.4	-0.8	-0.4	-0.2	-0.7	-0.2	-0.2	-0.6	-0.5
48	-0.2	-0.3	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.3
50	-0.5	-0.3	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	0.1	-0.6	-0.6
52	-0.3	-0.2	-0.5	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.6	-0.4
54	-0.5	0.2	-0.6	-0.4	-0.6	-0.3	-0.4	-0.1	-0.3	-0.6
56	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.6	-0.4
58	-0.3	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.4	-0.3
60	-0.4	-0.3	-0.5	-0.4	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.8	-0.4

2.3.1.2 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุแต่ละชนิด (mean ± SD.)

นาทีที่	MTA (^{O}C)	OWPC (^{O}C)	AWPC (^{O}C)
2	0.92 ± 0.48^{a}	0.96 ± 0.17^{a}	0.34 ± 0.47^{b}
4	0.56 ± 0.32	0.67 ± 0.24	0.37 ± 0.27
6	0.64 ± 0.42	0.65 ± 0.28	0.54 ± 0.22
8	0.34 ± 0.17	0.58 ± 0.18	0.33 ± 0.22
10	0.32 ± 0.16	0.5 ± 0.16	0.21 ± 0.16
12	0.32 ± 0.16	0.41 ± 0.15	0.20 ± 0.25
			continue

นาทีที่	MTA (^{O}C)	OWPC (^{O}C)	AWPC (^{O}C)
14	0.38 ± 0.24	0.44 ± 0.27	0.26 ± 0.22
16	0.4 ± 0.07	0.35 ± 0.26	-0.02 ± 0.38
18	0.3 ± 0.16	0.37 ± 0.29	-0.08 ± 0.38
20	0.4 ± 0.10	0.33 ± 0.35	-0.29 ± 0.30
22	0.18 ± 0.19	0.41 ± 0.24	-0.35 ± 0.23
24	0.06 ± 0.21	0.41 ± 0.41	-0.33 ± 0.34
26	0.10 ± 0.22	0.33 ± 0.28	-0.44 ± 0.33
28	0.12 ± 0.30	0.39 ± 0.29	-0.46 ± 0.39
30	0.06 ± 0.18^{a}	0.47 ± 0.31^{a}	-0.39 ± 0.35^{b}
32	-0.08 ± 0.16	0.19 ± 0.15	-0.43 ± 0.40
34	0.04 ± 0.25	0.31 ± 0.20	-0.59 ± 0.13
36	-0.26 ± 0.18	0.28 ± 0.32	-0.56 ± 0.22
38	-0.14 ± 0.21	0.28 ± 0.31	-0.43 ± 0.26
40	-0.04 ± 0.15	-0.11 ± 0.37	-0.45 ± 0.27
42	-0.02 ±0.13	-0.22 ± 0.36	-0.50 ± 0.17
44	-0.04 ± 0.19	-0.22 ± 0.32	-0.49 ± 0.22
46	-0.04 ± 0.09	-0.14 ± 0.23	-0.45 ± 0.21
48	0.02 ± 0.18	-0.18 ± 0.35	-0.44 ± 0.15
50	0.1 ± 0.24	-0.1 ± 0.33	-0.43 ± 0.21
52	-0.02 ± 0.22	-0.19 ± 0.32	-0.38 ± 0.11
54	0.00 ± 0.10	-0.32 ± 0.33	-0.36 ± 0.25
56	-0.10 ± 0.27	-0.39 ± 0.30	-0.41 ± 0.08
58	-0.14 ± 0.18	-0.38 ± 0.37	-0.41 ± 0.18
60	-0.10 ± 0.23^{a}	-0.4 ± 0.21^{b}	-0.40 ± 0.19^{b}

ที่เวลา 2 นาที 30 นาที และ 60 นาที ตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 แสดงข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะแข็งตัว

Descriptive Statistics

Material		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
1 MTA	min2	5	0.92	0.48166378	0.4	1.5
	min4	5	0.56	0.32093613	0.1	1
	min6	5	0.64	0.42190046	0.3	1.3
	min8	5	0.34	0.16733201	0.2	0.6
	min10	5	0.32	0.16431677	0.1	0.5
	min12	5	0.32	0.16431677	0.2	0.6
	min14	5	0.38	0.23874673	0.2	0.8
	min16	5	0.4	0.07071068	0.3	0.5
	min18	5	0.3	0.15811388	0.1	0.5
	min20	5	0.4	0.1	0.3	0.5
	min22	5	0.18	0.19235384	-0.1	0.4
	min24	5	0.06	0.20736441	-0.1	0.4
	min26	5	0.1	0.2236068	-0.2	0.4
	min28	5	0.12	0.30331502	-0.4	0.4
	min30	5	0.06	0.18165902	-0.2	0.3
	min32	5	-0.08	0.16431677	-0.3	0.1
	min34	5	0.04	0.25099801	-0.2	0.4
	min36	5	-0.26	0.18165902	-0.5	0
	min38	5	-0.14	0.20736441	-0.3	0.2
	min40	5	-0.04	0.15165751	-0.2	0.1
	min42	5	-0.02	0.13038405	-0.2	0.1
	min44	5	-0.04	0.19493589	-0.3	0.2
	min46	5	-0.04	0.08944272	-0.1	0.1
	min48	5	0.02	0.17888544	-0.1	0.3
	min50	5	0.1	0.24494897	-0.3	0.3
	min52	5	-0.02	0.21679483	-0.2	0.3
	min54	5	0	0.1	-0.1	0.1
	min56	5	-0.1	0.27386128	-0.5	0.2
	min58	5	-0.14	0.18165902	-0.3	0.1
	min60	5	-0.1	0.23452079	-0.3	0.2
2OWPC	min2	10	0.96	0.17126977	0.6	1.2
	min4	10	0.67	0.2406011	0.4	1
	min6	10	0.65	0.28382311	0.2	1.2
	min8	10	0.58	0.17511901	0.4	0.9
	min10	10	0.5	0.16329932	0.3	0.9
	min12	10	0.41	0.15238839	0.2	0.7
	min14	10	0.44	0.2674987	0.2	0.9
	min16	10	0.35	0.26352314	0	0.9
	min18	10	0.37	0.29078438	0	0.8
	min20	10	0.33	0.3465705	-0.1	0.9
	min22	10	0.41	0.24244129	0.1	0.7
	min24	10	0.41	0.4121758	-0.3	1
	min26	10	0.33	0.28693786	0.1	0.9
	min28	10	0.39	0.29230882	-0.2	0.8
	min30	10	0.47	0.30568684	0	0.9
	min32	10	0.19	0.15238839	-0.1	0.4
	min34	10	0.31	0.20248457	0	0.6
	min36	10	0.28	0.3190263	-0.3	0.6
	min38	10	0.28	0.30840089	-0.1	0.9
	min40	10	-0.11	0.36953424	-0.6	0.4
	min42	10	-0.22	0.36453928	-0.6	0.7
	min44	10	-0.22	0.31552426	-0.6	0.5
	min46	10	-0.14	0.23190036	-0.6	0.2

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
	min48	10	-0.18	0.35213634	-0.8	0.5
	min50	10	-0.1	0.33665016	-0.8	0.5
	min52	10	-0.19	0.3247221	-0.7	0.3
	min54	10	-0.32	0.32930904	-1	0.1
	min56	10	-0.39	0.29981476	-1	-0.1
	min58	10	-0.38	0.37357135	-1.1	0
	min60	10	-0.4	0.20548047	-0.7	-0.1
3AWPC	min2	10	0.34	0.47656176	-0.4	0.34
	min4	10	0.37	0.27100635	-0.2	0.37
	min6	10	0.54	0.21705094	0.2	0.54
	min8	10	0.33	0.22135944	0	0.33
	min10	10	0.21	0.166333	-0.2	0.21
	min12	10	0.2	0.2538591	-0.1	0.2
	min14	10	0.26	0.22211108	-0.2	0.26
	min16	10	-0.02	0.37947332	-0.7	-0.02
	min18	10	-0.08	0.38528489	-0.9	-0.08
	min20	10	-0.29	0.29608557	-1	-0.29
	min22	10	-0.35	0.2321398	-0.7	-0.35
	min24	10	-0.33	0.33681515	-0.9	-0.33
	min26	10	-0.44	0.33399933	-1.3	-0.44
	min28	10	-0.46	0.3921451	-1.2	-0.46
	min30	10	-0.39	0.35103023	-0.9	-0.39
	min32	10	-0.43	0.39735235	-0.8	-0.43
	min34	10	-0.59	0.12866839	-0.8	-0.59
	min36	10	-0.56	0.22211108	-1	-0.56
	min38	10	-0.43	0.26267851	-0.8	-0.43
	min40	10	-0.45	0.26770631	-0.8	-0.45
	min42	10	-0.5	0.16996732	-0.8	-0.5
	min44	10	-0.49	0.21832697	-0.8	-0.49
	min46	10	-0.45	0.21213203	-0.8	-0.45
	min48	10	-0.44	0.15055453	-0.7	-0.44
	Min50	10	-0.43	0.21108187	-0.6	0.1
	min52	10	-0.38	0.11352924	-0.6	-0.2
	min54	10	-0.36	0.25473298	-0.6	0.2
	min56	10	-0.41	0.0875595	-0.6	-0.3
	min58	10	-0.41	0.17919573	-0.8	-0.2
	min60	10	-0.4	0.19436506	-0.8	-0.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Material			min 2	min 30	min 60
1 MTA + distilled water	N		5	5	5
	Normal Parametersa	Mean	0.92	0.06	-0.1
		Std. Deviation	0.48166378	0.18165902	0.23452079
	Most Extreme Differences	Absolute	0.20838968	0.21286052	0.26509232
		Positive	0.20838968	0.21286052	0.26509232
		Negative	-0.1849241	-0.1871395	-0.2031157
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.4659735	0.47597059	0.59276445
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.98167067	0.97727545	0.87371595
2 OWPC + distilled water	N		10	10	10
	Normal Parametersa	Mean	0.96	0.47	-0.4
		Std. Deviation	0.17126977	0.30568684	0.20548047
	Most Extreme Differences	Absolute	0.1923327	0.15982561	0.13480498
		Positive	0.1076673	0.11093719	0.12785397
		Negative	-0.1923327	-0.1598256	-0.134805
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.60820941	0.50541296	0.42629076
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.85322936	0.96037706	0.99337765
3 AWPC + 1.8% PC	N		10	10	10
	Normal Parametersa	Mean	0.34	-0.39	-0.4
		Std. Deviation	0.47656176	0.35103023	0.19436506
	Most Extreme Differences	Absolute	0.18446647	0.21136336	0.2
		Positive	0.16853414	0.21136336	0.15174183
		Negative	-0.1844665	-0.1886366	-0.2
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.58333419	0.66838964	0.63245553
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.88555086	0.7630038	0.81862117

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะแข็งตัวด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

	(I) Material	(J) Material	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
min2	1 MTA	2 OWPC	-0.04	0.21006493	0.98204863	-0.5912639	0.5112639
		3 AWPC	0.58	0.21006493	0.03790225	0.0287361	1.1312639
	2 OWPC	1 MTA	0.04	0.21006493	0.98204863	-0.5112639	0.5912639
		3 AWPC	0.62	0.17151729	0.00592651	0.16989491	1.07010509
	3 AWPC	1 MTA	-0.58	0.21006493	0.03790225	-1.1312639	-0.0287361
		2 OWPC	-0.62	0.17151729	0.00592651	-1.0701051	-0.1698949
min30	1 MTA	2 OWPC	-0.41	0.16849602	0.07268158	-0.8521765	0.0321765
		3 AWPC	0.45	0.16849602	0.04554949	0.0078235	0.8921765
	2 OWPC	1 MTA	0.41	0.16849602	0.07268158	-0.0321765	0.8521765
		3 AWPC	0.86	0.13757643	1.3246E-05	0.4989644	1.2210356
	3 AWPC	1 MTA	-0.45	0.16849602	0.04554949	-0.8921765	-0.0078235
		2 OWPC	-0.86	0.13757643	1.3246E-05	-1.2210356	-0.4989644
min60	1 MTA	2 OWPC	0.3	0.11321741	0.04750812	0.00288866	0.59711134
		3 AWPC	0.3	0.11321741	0.04750812	0.00288866	0.59711134
	2 OWPC	1 MTA	-0.3	0.11321741	0.04750812	-0.5971113	-0.0028887
		3 AWPC	0.00	0.09244163	1	-0.2425904	0.24259039
	3 AWPC	1 MTA	-0.3	0.11321741	0.04750812	-0.5971113	-0.0028887
		2 OWPC	0.00	0.09244163	1	-0.2425904	0.24259039

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 การศึกษาความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัว

2.4.1 ข้อมูลแสดงความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัว

2.4.1.1 ข้อมูลดิบ

ความเป็นกรด-ด่าง (ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัวของไวท์โปรรูทเอมทีเอ ผสมน้ำกลั่น

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5
2	11.3	11.29	11.45	11.22	11.34
4	11.47	11.45	11.52	11.46	11.51
6	11.70	11.65	11.38	11.68	11.79
8	11.69	11.43	11.45	11.72	11.77
10	10.91	11.02	11.55	11.81	11.67
12	11.69	11.56	11.46	11.93	11.65
14	11.10	11.36	11.47	11.99	11.91
16	11.17	11.40	11.53	11.73	11.84
18	10.93	11.06	11.72	12.05	11.98
20	10.75	11.35	11.59	11.98	12.07
22	11.22	11.18	11.63	11.71	12.14
24	11.29	11.19	11.55	11.81	11.97
26	11.63	11.36	11.73	11.91	12.13
28	11.58	11.65	11.43	12.11	12.01
30	11.42	11.14	11.91	11.64	12.14
32	11.45	11.66	11.81	11.87	12.03
34	11.39	11.42	11.97	11.75	12.17
36	11.34	11.27	12.05	11.64	12.26
38	11.43	11.35	11.78	11.91	12.13
40	11.40	11.29	11.56	12.08	12.22
42	11.62	11.42	11.71	12.12	12.09

continue

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5
44	11.45	11.43	11.65	11.99	12.30
46	11.36	11.20	11.89	12.15	12.37
48	11.39	11.08	12.04	12.24	12.30
50	11.42	11.75	11.63	12.05	12.38
52	11.55	11.86	11.86	12.17	12.26
54	11.40	11.93	12.07	12.21	12.41
56	11.59	11.82	12.15	12.09	12.20
58	11.78	11.67	12.03	12.32	12.49
60	11.68	11.78	12.07	12.28	12.23

ความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
2	10.06	9.06	9.82	10.00	10.34	10.27	9.83	10.04	10.44	10.33
4	10.02	10.20	11.20	10.74	10.48	10.45	10.82	10.66	10.63	10.99
6	10.59	10.00	11.25	10.86	10.96	10.89	11.01	10.99	11.25	11.09
8	10.55	10.61	10.59	10.66	11.03	11.00	11.08	10.98	11.78	11.65
10	10.59	10.54	10.67	10.50	11.04	10.77	10.99	11.22	11.99	11.88
12	10.91	10.30	10.66	10.68	11.07	10.79	10.95	11.18	12.04	12.13
14	11.12	10.48	10.62	10.62	11.02	10.89	11.02	11.09	12.19	12.16
16	11.35	10.69	10.69	10.52	11.11	10.94	11.10	11.14	12.43	12.28
18	11.54	10.86	10.70	11.07	11.17	11.03	11.25	11.28	12.58	12.46
20	11.13	10.81	10.85	11.02	11.21	11.16	11.25	11.36	12.44	12.63
22	11.18	10.66	10.92	11.05	11.27	11.20	11.29	11.39	12.64	12.54
24	11.02	10.60	11.32	11.09	11.38	11.32	11.35	11.54	12.47	12.47

continue

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
26	11.14	10.70	11.26	11.03	11.57	11.63	11.47	11.65	12.49	12.40
28	10.88	10.52	10.80	10.91	11.42	11.50	11.31	11.70	12.37	12.44
30	10.92	10.55	11.91	11.01	11.34	11.38	11.40	11.59	12.41	12.48
32	10.78	10.29	10.48	10.49	11.11	11.05	11.2	11.22	12.28	12.37
34	10.77	10.29	10.32	10.45	11.29	11.09	11.23	11.38	12.12	12.45
36	10.83	10.37	10.39	10.61	11.01	11.10	11.13	11.29	12.33	12.01
38	10.90	10.45	10.31	10.11	11.72	11.31	10.89	11.44	12.22	12.23
40	10.87	10.47	10.40	10.42	11.70	11.78	10.93	11.21	12.04	12.17
42	10.65	10.23	10.33	10.43	11.72	11.86	10.84	11.36	11.99	12.05
44	10.72	10.81	10.27	10.24	11.79	11.11	11.03	11.66	11.95	11.98
46	10.83	10.75	10.21	10.23	11.85	11.69	11.16	11.44	12.07	11.73
48	10.97	10.65	10.20	10.16	11.63	11.65	11.01	11.48	12.01	12.01
50	11.01	10.89	10.23	10.10	11.42	11.55	11.14	11.52	11.93	11.96
52	10.67	10.73	9.96	10.24	11.32	11.11	11.00	11.62	11.98	11.84
54	10.66	10.64	10.17	10.25	11.41	11.22	11.03	11.55	11.73	11.66
56	10.50	10.79	10.15	10.07	11.44	11.33	11.13	11.49	11.89	11.72
58	10.61	10.65	10.01	9.98	11.48	11.14	11.15	11.53	11.91	11.77
60	10.42	10.53	10.04	9.66	11.32	11.53	11.21	11.44	11.72	11.59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
2	9.66	9.65	9.20	9.91	10.33	9.83	11.00	9.93	10.05	11.35
4	9.4	10.08	9.55	11.03	10.46	10.31	11.23	10.82	10.33	11.63
6	9.66	10.41	9.96	11.54	11.48	11.04	11.08	10.99	10.64	11.58

continue

เวลา (นาที)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 4	ชิ้นที่ 5	ชิ้นที่ 6	ชิ้นที่ 7	ชิ้นที่ 8	ชิ้นที่ 9	ชิ้นที่ 10
8	9.77	10.67	10.60	11.12	11.03	11.13	11.00	11.62	10.70	11.52
10	10.40	10.69	10.50	12.03	11.27	11.85	11.02	12.01	11.01	11.49
12	10.97	11.32	11.04	12.33	11.50	11.93	10.98	12.02	11.53	11.44
14	11.05	11.07	11.32	12.04	11.61	12.01	11.11	11.77	11.55	11.63
16	10.94	11.11	10.92	11.93	11.45	11.55	11.16	12.03	11.66	11.79
18	11.11	11.19	11.04	11.86	11.34	12.03	11.15	12.09	11.38	11.59
20	11.15	11.00	11.01	12.13	11.85	12.38	11.22	12.23	11.59	11.78
22	11.65	11.01	11.05	12.56	12.44	12.46	11.23	12.24	11.86	11.89
24	11.25	11.19	11.25	12.43	12.31	12.14	11.08	11.25	11.81	11.69
26	11.32	11.42	11.29	12.46	12.20	12.30	11.11	12.06	11.82	11.70
28	10.62	11.03	11.19	12.23	12.15	12.03	11.21	11.99	11.65	11.71
30	10.5	11.00	11.15	12.13	12.08	12.08	11.18	11.85	11.49	11.66
32	10.57	10.93	10.94	12.04	11.79	11.99	11.09	11.82	11.38	11.53
34	10.58	10.98	11.05	11.87	11.66	11.81	11.06	11.66	11.33	11.58
36	10.66	10.34	10.83	11.53	11.20	11.67	11.15	11.58	11.02	11.64
38	10.52	10.04	10.62	11.81	11.01	11.74	11.04	11.63	10.96	11.60
40	10.44	10.46	10.43	11.51	11.34	11.51	10.97	11.47	10.95	11.40
42	10.50	10.26	10.22	11.50	11.22	11.55	10.91	11.44	10.88	11.39
44	10.58	10.41	10.39	11.54	11.35	11.53	10.92	11.30	10.97	11.38
46	10.56	10.32	10.21	11.48	11.38	11.49	10.65	11.32	10.91	11.45
48	10.59	10.32	10.45	11.52	11.27	11.47	10.83	11.32	10.94	11.47
50	10.49	10.66	10.44	11.55	11.32	11.52	10.88	11.28	10.90	11.53
52	10.46	10.39	10.32	11.51	11.20	11.44	10.84	11.33	10.89	11.44
54	10.36	10.42	10.50	11.48	11.18	11.48	10.96	11.27	10.85	11.43
56	10.32	10.49	10.31	11.52	11.11	11.40	10.83	11.39	10.76	11.49
58	10.3	10.51	10.55	11.58	11.14	11.43	10.76	11.20	10.82	11.42
60	10.35	10.49	10.43	11.43	11.13	11.47	10.84	11.25	10.88	11.37

2.4.1.2 แสดงค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ของวัสดุแต่ละชนิด (mean ± SD.)

นาทีที่	MTA (pH)	OWPC (pH)	AWPC (pH)
2	11.32 ± 0.08[a]	10.02 ± 0.40[b]	10.09 ± 0.65[b]
4	11.482 ± 0.03	10.62 ± 0.35	10.48 ± 0.71
6	11.64 ± 0.15	10.89 ± 0.37	10.84 ±0.66
8	11.61 ± 0.16	10.99 ± 0.43	10.92 ± 0.53
10	11.39 ± 0.40	11.02 ± 0.54	11.23 ± 0.61
12	11.66 ± 0.18	11.07 ± 0.59	11.51 ± 0.46
14	11.57 ± 0.38	11.12 ± 0.60	11.52 ± 0.37
16	11.53 ± 0.27	11.23 ± 0.65	11.45 ± 0.41
18	11.55 ± 0.52	11.39 ± 0.64	11.48 ± 0.39
20	11.55 ± 0.53	11.39 ± 0.63	11.63 ± 0.52
22	11.58 ± 0.39	11.41 ± 0.65	11.84 ± 0.59
24	11.56 ± 0.33	11.46 ± 0.59	11.64 ± 0.51
26	11.75 ± 0.29	11.53 ± 0.56	11.77 ± 0.47
28	11.76 ± 0.29	11.39 ± 0.65	11.58 ± 0.54
30	11.65 ± 0.39[a]	11.50 ± 0.62[a]	11.51 ± 0.55[a]
32	11.76 ± 0.22	11.13 ± 0.71	11.41 ± 0.51
34	11.74 ± 0.34	11.14 ± 0.73	11.36 ± 0.43
36	11.71 ± 0.43	11.11 ± 0.64	11.16 ± 0.45
38	11.72 ± 0.33	11.16 ± 0.76	11.10 ± 0.59
40	11.71 ± 0.42	11.20 ± 0.68	11.05 ± 0.46
42	11.79 ± 0.30	11.15 ± 0.73	10.99 ± 0.51
44	11.76 ± 0.37	11.16 ± 0.66	11.04 ± 0.51
46	11.79 ± 0.50	11.20 ± 0.67	10.98 ± 0.51
48	11.81 ± 0.54	11.18 ± 0.69	11.02 ± 0.45

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นาทีที่	MTA (pH)	OWPC (pH)	AWPC (pH)
50	11.85 ± 0.38	11.18 ± 0.64	11.06 ± 0.43
52	11.94 ± 0.28	11.05 ± 0.67	10.98 ± 0.46
54	12.00 ± 0.38	11.03 ± 0.58	10.99 ± 0.44
56	11.97 ± 0.26	11.05 ± 0.64	10.96 ± 0.48
58	12.06 ± 0.35	11.02 ± 0.69	10.97 ± 0.44
60	12.01 ± 0.27[a]	10.95 ± 0.73[b]	10.96 ± 0.43[b]

ที่เวลา 2 นาที 30 นาที และ 60 นาที ตัวอักษร a และ b ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

2.4.2 แสดงข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัว

Descriptive Statistics

Material		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
1 MTA	min2	5	11.32	0.084557673	11.22	11.45
	min4	5	11.482	0.031144823	11.45	11.52
	min6	5	11.64	0.154434452	11.38	11.79
	min8	5	11.612	0.159749804	11.43	11.77
	min10	5	11.392	0.402392843	10.91	11.81
	min12	5	11.658	0.175982954	11.46	11.93
	min14	5	11.566	0.37647045	11.1	11.99
	min16	5	11.534	0.265763052	11.17	11.84
	min18	5	11.548	0.521603298	10.93	12.05
	min20	5	11.548	0.533122875	10.75	12.07
	min22	5	11.576	0.394499683	11.18	12.14
	min24	5	11.562	0.331843337	11.19	11.97
	min26	5	11.752	0.290206823	11.36	12.13
	min28	5	11.756	0.290826409	11.43	12.11
	min30	5	11.65	0.393954312	11.14	12.14
	min32	5	11.764	0.219954541	11.45	12.03
	min34	5	11.74	0.340147027	11.39	12.17
	min36	5	11.712	0.434016129	11.27	12.26
	min38	5	11.72	0.327414111	11.35	12.13
	min40	5	11.71	0.415932687	11.29	12.22
	min42	5	11.792	0.30458168	11.42	12.12
	min44	5	11.764	0.374673191	11.43	12.3
	min46	5	11.794	0.502225049	11.2	12.37
	min48	5	11.81	0.544793539	11.08	12.3
	min50	5	11.846	0.375539612	11.42	12.38
	min52	5	11.94	0.282931087	11.55	12.26
	min54	5	12.004	0.381418405	11.4	12.41
	min56	5	11.97	0.258166613	11.59	12.2
	min58	5	12.058	0.347807418	11.67	12.49
	min60	5	12.008	0.267712532	11.68	12.28
						continue

Material		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
2 OWPC	min2	10	10.019	0.399651237	9.06	10.44
	min4	10	10.619	0.351866452	10.02	11.2
	min6	10	10.889	0.366892355	10	11.25
	min8	10	10.993	0.431587509	10.55	11.78
	min10	10	11.019	0.536707038	10.5	11.99
	min12	10	11.071	0.587659198	10.3	12.13
	min14	10	11.121	0.597205529	10.48	12.19
	min16	10	11.225	0.646997338	10.52	12.43
	min18	10	11.394	0.637045263	10.7	12.58
	min20	10	11.386	0.630541214	10.81	12.63
	min22	10	11.414	0.654322381	10.66	12.64
	min24	10	11.456	0.593879898	10.6	12.47
	min26	10	11.534	0.564883469	10.7	12.49
	min28	10	11.385	0.647529493	10.52	12.44
	min30	10	11.499	0.623047171	10.55	12.48
	min32	10	11.127	0.710243307	10.29	12.37
	min34	10	11.139	0.728399311	10.29	12.45
	min36	10	11.107	0.64425754	10.37	12.33
	min38	10	11.158	0.756641703	10.11	12.23
	min40	10	11.199	0.682811996	10.4	12.17
	min42	10	11.146	0.728151388	10.23	12.05
	min44	10	11.156	0.659733953	10.24	11.98
	min46	10	11.196	0.668317955	10.21	12.07
	min48	10	11.177	0.686845446	10.16	12.01
	min50	10	11.175	0.63807436	10.1	11.96
	min52	10	11.047	0.665316132	9.96	11.98
	min54	10	11.032	0.574916419	10.17	11.73
	min56	10	11.051	0.643384281	10.07	11.89
	min58	10	11.023	0.688332123	9.98	11.91
	min60	10	10.946	0.725169712	9.66	11.72
3AWPC	min2	10	10.091	0.647309818	9.2	11.35
	min4	10	10.484	0.71071482	9.4	11.63
	min6	10	10.838	0.663237849	9.66	11.58
	min8	10	10.916	0.525805203	9.77	11.62
	min10	10	11.227	0.606246191	10.4	12.03
	min12	10	11.506	0.464714966	10.97	12.33
	min14	10	11.516	0.368998645	11.05	12.04
	min16	10	11.454	0.405111782	10.92	12.03
	min18	10	11.478	0.392167765	11.04	12.09
	min20	10	11.634	0.519041852	11	12.38
	min22	10	11.839	0.591315858	11.01	12.56
	min24	10	11.64	0.508461732	11.08	12.43
	min26	10	11.768	0.474266685	11.11	12.46
	min28	10	11.581	0.542923158	10.62	12.23
	min30	10	11.512	0.546845499	10.5	12.13
	min32	10	11.408	0.507757597	10.57	12.04
	min34	10	11.358	0.425670713	10.58	11.87
	min36	10	11.162	0.454161009	10.34	11.67
	min38	10	11.097	0.593128242	10.04	11.81
	min40	10	11.048	0.462740628	10.43	11.51
	min42	10	10.987	0.513529183	10.22	11.55
	min44	10	11.037	0.449643068	10.39	11.54
	min46	10	10.977	0.508287976	10.21	11.49
	min48	10	11.018	0.453352941	10.32	11.52
	min50	10	11.057	0.436629769	10.44	11.55
	min52	10	10.982	0.466280793	10.32	11.51

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Material		N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
3AWPC	min54	10	10.993	0.443547567	10.36	11.48
	min56	10	10.962	0.483661957	10.31	11.52
	min58	10	10.971	0.443657776	10.3	11.58
	min60	10	10.964	0.429035093	10.35	11.47

2.4.3 แสดงการวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูล

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

Material			min 2	min 30	min 60
1 MTA + distilled water	N		5	5	5
	Normal Parametersa	Mean	11.32	11.65	12.008
		Std. Deviation	0.0 45576	0.3939543	0.2677125
	Most Extreme Dif erences	Absolute	0.2065126	0.1453650	0.2027985
		Positive	0.2065126	0.120330	0.2027985
		Negative	-0.161374	-0.1453650	-0.1965178
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.4617763	0.3250461	0.4534712
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.9833269	0.9999345	0.9862905
2 OWPC + distilled water	N		10	10	10
	Normal Parametersa	Mean	10.019	11.499	10.946
		Std. Deviation	0.3996512	0.623047171	0.7251697
	Most Extreme Differences	Absolute	0.2092652	0.163124781	0.2420906
		Positive	0.1460746	0.163124781	0.1429099
		Negative	-0.2092652	-0.128152491	-0.2420906
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.6617547	0.515845852	0.7655579
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.7735854	0.952895959	0.6010497
3 AWPC + 1.8%PC	N		10	10	10
	Normal Parametersa	Mean	10.091	11.512	10.964
		Std. Deviation	0.6473098	0.5468454	0.4290350
	Most Extreme Differences	Absolute	0.2252517	0.1505242	0.1653778
		Positive	0.2252517	0.1292132	0.1653778
		Negative	-0.1478467	-0.1505242	-0.1505903
	Kolmogorov-Smirnov Z		0.7123085	0.4759995	0.5229708
	Asymp. Sig. (2-tailed)		0.6906594	0.9772617	0.9473266

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.4 แสดงความเป็นกรด-ด่าง(ค่าพีเอช) ขณะแข็งตัวด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

	(I) Material	(J) Material	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval Lower Bound	95% Confidence Interval Upper Bound
min2	1 MTA	2 OWPC	1.301	0.26723789	0.00032174	0.59969966	2.0023003
		3 AWPC	1.229	0.26723789	0.00060516	0.52769966	1.9303003
	2 OWPC	1 MTA	-1.301	0.26723789	0.00032174	-2.0023003	-0.5996996
		3 AWPC	-0.072	0.21819882	0.94714106	-0.6446093	0.5006093
	3 AWPC	1 MTA	-1.229	0.26723789	0.00060516	-1.9303003	-0.5276996
		2 OWPC	0.072	0.21819882	0.94714106	-0.5006093	0.6446093
min30	1 MTA	2 OWPC	0.151	0.30464248	0.88500671	-0.6484595	0.9504595
		3 AWPC	0.138	0.30464248	0.90291719	-0.6614595	0.9374595
	2 OWPC	1 MTA	-0.151	0.30464248	0.88500671	-0.9504595	0.6484595
		3 AWPC	-0.013	0.24873955	0.99863528	-0.6657559	0.6397559
	3 AWPC	1 MTA	-0.138	0.30464248	0.90291719	-0.9374595	0.6614595
		2 OWPC	0.013	0.24873955	0.99863528	-0.6397559	0.6657559
min60	1 MTA	2 OWPC	1.062	0.25869115	0.00403063	0.3497374	1.7742625
		3 AWPC	1.044	0.18094505	0.00026281	0.5430098	1.5449901
	2 OWPC	1 MTA	-1.062	0.25869115	0.00403063	-1.7742625	-0.3497374
		3 AWPC	-0.018	0.26644741	0.99985158	-0.7358222	0.6998222
	3 AWPC	1 MTA	-1.044	0.18094505	0.00026281	-1.5449901	-0.5430098
		2 OWPC	0.018	0.26644741	0.99985158	-0.6998222	0.7358222

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

2.5 การศึกษาปริมาณโลหะหนัก

สาร	MTA	OWPC			AWPC			Control
		ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	
As	0.5	2.75	2.75	3.5	0.75	0.75	0.5	< 0.25
Pb	< 0.25	4.25	3.25	3	< 0.25	< 0.25	< 0.25	< 0.25
Cd	<0.025	0.3	0.425	0.375	0.05	0.05	0.05	< 0.025

ปริมาณโลหะหนัก หน่วยส่วนในล้านส่วน (ppm.: part per million)

2.6 การศึกษาขนาดอนุภาค

2.6.1 ข้อมูลดิบร้อยละและการกระจายตัวของอนุภาคแบ่งตามขนาด

ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคแยกตามขนาด (หน่วย %)									
ขนาด	MTA			OWPC			AWPC		
(μm)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.42	0.4	0.4	0.4	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.35
0.49	1.03	1.03	1.03	0.98	0.97	0.98	0.85	0.85	0.90
0.58	1.54	1.54	1.53	1.49	1.49	1.49	1.26	1.26	1.32
0.67	1.89	1.88	1.88	1.84	1.84	1.84	1.55	1.55	1.60
0.78	2.08	2.08	2.08	1.91	1.91	1.90	1.72	1.72	1.75
0.91	2.31	2.3	2.3	1.97	1.97	1.97	1.92	1.92	1.94
1.06	2.56	2.56	2.56	2.04	2.03	2.03	2.16	2.16	2.19
1.24	2.89	2.88	2.88	2.15	2.14	2.13	2.51	2.51	2.55
1.44	3.29	3.29	3.29	2.35	2.34	2.33	3.04	3.04	3.04
1.68	3.66	3.66	3.66	2.62	2.60	2.58	3.58	3.59	3.55

continue

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคแยกตามขนาด (หน่วย %)									
ขนาด	MTA			OWPC			AWPC		
(μm)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3
1.95	3.89	3.89	3.89	2.89	2.87	2.85	3.98	3.98	3.95
2.28	4.03	4.03	4.03	3.23	3.21	3.18	4.33	4.33	4.27
2.65	4.01	4.01	4.02	3.54	3.53	3.51	4.45	4.45	4.41
3.09	3.94	3.95	3.96	3.88	3.88	3.86	4.48	4.47	4.44
3.6	3.89	3.89	3.9	4.23	4.23	4.24	4.42	4.42	4.4
4.19	3.92	3.92	3.93	4.59	4.62	4.64	4.38	4.37	4.36
4.88	4.06	4.06	4.06	4.98	5.01	5.05	4.39	4.37	4.37
5.69	4.3	4.3	4.3	5.36	5.41	5.47	4.46	4.45	4.45
6.63	4.61	4.6	4.6	5.71	5.76	5.84	4.59	4.58	4.58
7.72	4.93	4.92	4.9	5.99	6.04	6.13	4.75	4.74	4.74
9	5.22	5.2	5.19	6.20	6.24	6.34	4.91	4.91	4.91
10.48	5.49	5.46	5.44	6.35	6.39	6.49	5.07	5.07	5.08
12.21	5.32	5.29	5.28	5.99	6.00	6.08	4.96	4.96	4.97
14.22	4.88	4.86	4.86	4.35	4.34	4.38	4.66	4.66	4.67
16.57	4.24	4.23	4.23	4.50	4.48	4.48	4.19	4.19	4.20
19.31	3.6	3.61	3.61	3.65	3.62	3.57	3.61	3.62	3.62
22.49	2.96	2.98	2.98	2.81	2.77	2.67	3.04	3.04	3.04
26.2	2.33	2.35	2.36	1.96	1.91	1.77	2.46	2.47	2.46
30.53	1.69	1.72	1.74	1.12	1.05	0.87	1.89	1.90	1.88
35.56	1.05	1.11	1.11	0.98	1.02	1.00	1.31	1.32	1.29
41.43	0	0	0	0	0	0	0.73	0.75	0.71
48.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
								continue	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ร้อยละการกระจายตัวของอนุภาคแยกตามขนาด (หน่วย %)									
ขนาด	MTA			OWPC			AWPC		
(μm)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3
88.91	0	0	0	0	0	0	0	0	0
103.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0
163.77	0	0	0	0	0	0	0	0	0
190.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
222.28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
258.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0
301.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0
351.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
409.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
477.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
555.71	0	0	0	0	0	0	0	0	0
647.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
754.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ร้อยละการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบ่งตามช่วงชั้น									
ขนาด	MTA			OWPC			AWPC		
(µm)	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3	ชิ้นที่ 1	ชิ้นที่ 2	ชิ้นที่ 3
< 1 µm	10.79	10.77	10.77	9.754	9.74	9.73	8.95	8.95	9.16
1.01-10 µm	61.37	61.32	61.32	62.81	63.01	63.35	62.56	62.50	62.34
10.01-20 µm	20.50	20.42	20.39	21.16	21.12	21.46	19.69	19.70	19.75
20.01-30 µm	6.12	6.19	6.22	5.14	5.00	4.36	6.53	6.55	6.52
>30 µm	1.26	1.30	1.32	1.12	1.15	1.11	2.27	2.30	2.23
Mean (µm)	8.65	8.68	8.69	8.54	8.51	8.43	9.10	9.12	9.08
Median (µm)	5.82	5.82	5.82	6.56	6.56	6.56	5.82	5.82	5.81

2.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคด้วยครูเครียส วาลิส

Kruskal-Wallis test

Variables: MTA <1 micron, OWPC < 1 micron, AWPC < 1 micron

Groups = 3

df = 2

Total observations = 9

T = 5.6

P = 0.0608

Adjusted for ties:

T = 5.694915

P = 0.058

Variables: MTA .01-10 micron, OWPC.01-10 micron, AWPC.01-10 micron

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

MTA .01-10 micron vs. OWPC.01-10 micron not significant

(|2.818009| > 3.314493) P = 0.114

MTA .01-10 micron vs. AWPC.01-10 micron not significant

(|2.818009| > 3.314493) P = 0.114

OWPC.01-10 micron vs. AWPC.01-10 micron not significant

(|-2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

Variables: MTA 10.01-20 micron, OWPC 10.01-20 micron, AWPC 10.01-20 micron

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

MTA 10.01-20 micron vs. OWPC 10.01-20 micron not significant

(|2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

MTA 10.01-20 micron vs. AWPC 10.01-20 micron not significant

(|-2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

OWPC 10.01-20 micron vs. AWPC 10.01-20 micron not significant

(|-2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

Variables: MTA 20.01-30 micron, OWPC 20.01-30 micron, AWPC 20.01-30 micron

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

MTA 20.01-30 micron vs. OWPC 20.01-30 micron not significant

(|-2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

MTA 20.01-30 micron vs. AWPC 20.01-30 micron not significant

(|2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

OWPC 20.01-30 micron vs. AWPC 20.01-30 micron not significant

(|2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

Variables: MTA > 30 micron, OWPC > 30 micron, AWPC > 30 micron

MTA > 30 micron vs. OWPC > 30 micron not significant

(|-2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

MTA > 30 micron vs. AWPC > 30 micron not significant

(|2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

OWPC > 30 micron vs. AWPC > 30 micron not significant

(|2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

Mean

Kruskal-Wallis test

Variables: MTA average, OWPC average, AWPC average

Groups = 3

df = 2

Total observations = 9

T = 7.2

P = 0.0273

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

MTA average vs. OWPC average not significant

(|-2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

MTA average vs. AWPC average not significant

(|2.77746| > 3.314493) P = 0.1212

OWPC average vs. AWPC average not significant

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(|2.77746| > 3.314493)   P = 0.1212

Median

Kruskal-Wallis test

Variables: MTA median, OWPC median, AWPC median

Groups = 3

df = 2

Total observations = 9

T = 5.6

P = 0.0608

Kruskal-Wallis: all pairwise comparisons (Dwass-Steel-Chritchlow-Fligner)

Critical q (range) = 3.314493

MTA median vs. OWPC median	not significant
(|3.162278| > 3.314493)	P = 0.0653
MTA median vs. AWPC median	not significant
(|-1.414214| > 3.314493)	P = 0.5768
OWPC median vs. AWPC median	not significant
(|-3| > 3.314493)	P = 0.0855

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

2.7.1 ปริมาณธาตุในส่วนผงของซีเมนต์ (ร้อยละ)

ไวท์โปรรูทเอมทีเอ

ชิ้นที่	C	O	Al	Si	K	Ca	Cu	Bi	Zn	Na
1	29.22	32.46	0.69	3.54	0.19	15.37	0.85	17.67	0	0
2	24.22	34.12	0.63	4.16	0	18.68	0.81	16.63	0.74	0
3	23.59	35.29	0.83	4.29	0	22.21	0.76	12.77	0	0.27

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดา

ชิ้นที่	C	O	Al	Si	Ca	Cu	Zn	S
1	12.87	37.35	0.9	3.43	44.21	0.65	0	0.6
2	16.64	32.51	0.48	1.87	43.41	2.52	2.27	0.31
3	21.45	44.65	0.67	4.8	27.54	0.45	0	0.44

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัม

ชิ้นที่	C	O	Al	Si	Ca	Cu	Zn	Mg
1	16.51	41.04	0.9	4.97	34.81	1.03	0.74	0
2	20.58	42.87	1.5	5.67	28.66	0.47	0	0.26
3	16.32	41.18	0.94	2.77	33.94	2.91	1.94	0

2.7.2 ปริมาณธาตุในซีเมนต์ที่แข็งตัว (ร้อยละ)

ไวท์โปรรูทเอมทีเอผสมน้ำกลั่น

ชิ้นที่	C	O	Al	Si	Ca	Cu	Bi
1	21.77	50.15	0.54	3.45	15.36	0	8.73
2	24.24	46.48	0.47	3.71	16.11	0.55	8.45
3	21.6	49.02	0.48	4	16.64	0	8.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ธรรมดาผสมน้ำกลั่น

ชิ้นที่	C	O	Al	Si	Ca	S
1	29.84	53.75	1.04	4.22	17.63	0.51
2	21.43	50.83	1.06	4.53	21.62	0.53
3	21.73	53.45	0.92	4.08	19.23	0.58

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ปราศจากยิปซัมผสมโพลีคาร์บอกซีเลตซุปเปอร์พลาสติไซเซอร์

ชิ้นที่	C	O	Al	Si	Ca
1	20.87	57.67	1.06	4.34	16.05
2	29.49	50.16	0.86	3.24	16.26
3	22.34	47.55	1.23	4.83	24.05

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์ใน Journal of Endodontics **ฉบับ** 37 **เดือนมีนาคม พ.ศ.** 2554

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Setting Time and Flowability of Accelerated Portland Cement Mixed with Polycarboxylate Superplasticizer

Norachai Wongkornchaowalit, DDS, and Veera Lertchirakarn, DDS, MDSc, PhD

Abstract

Introduction: Important limitations of mineral trioxide aggregate for use in clinical procedures are extended setting time and difficult handling characteristics. The removal of gypsum at the end stage of the Portland cement manufacturing process and polycarboxylate superplasticizer admixture may solve these limitations. **Methods:** Different concentrations of polycarboxylate superplasticizer (0%, 1.2%, 1.8%, and 2.4% by volume) and liquid-to-powder ratios (0.27, 0.30, and 0.33 by weight) were mixed with white Portland cement without gypsum (AWPC-experimental material). Type 1 ordinary white Portland cement mixed with distilled water at the same ratios as the experimental material was used as controls. All samples were tested for setting time and flowability according to the International Organization for Standardization 6876:2001 guideline. The data were analyzed by two-way analysis of variance. Then, one-way analysis of variance and multiple comparison tests were used to analyze the significance among groups. **Results:** The data are presented in mean $\pm$ standard deviation values. In all experimental groups, the setting times were in the range of 4.2 $\pm$ 0.4 to 11.3 $\pm$ 0.2 minutes, which were significantly ($p < 0.05$) lower than the control groups (26.0 $\pm$ 2.4 to 54.8 $\pm$ 2.5 minutes). The mean flows of AWPC plus 1.8% and 2.4% polycarboxylate superplasticizer groups were significantly increased ($p < 0.001$) at all liquid-to-powder ratios compared with control groups. **Conclusions:** Polycarboxylate superplasticizer at concentrations of 1.8% and 2.4% and the experimental liquid-to-powder ratios reduced setting time and increased flowability of cement, which would be beneficial for clinical use. *(J Endod 2011;37:387–389)*

From the Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

Supported by Chulalongkorn University Centenary Academic Development Project and Chulalongkorn University Graduate Scholarship to Commemorate the 72nd Anniversary of His Majesty King Bhumibol Adulyadej.

Address requests for reprints to Dr Veera Lertchirakarn, Microbiology Department, Faculty of Dentistry, Chulalongkorn University, Henri-Dunant Road, Patumwan, Bangkok, Thailand 10330. E-mail address: veera.l@chula.ac.th

0099-2399/$ - see front matter

Copyright © 2011 American Association of Endodontists.

doi:10.1016/j.joen.2010.11.039

Key Words

Accelerated Portland cement, flowability, polycarboxylate superplasticizer, portland cement without gypsum, setting time

Mineral trioxide aggregate (MTA) was originally introduced as a root end filling and lateral root perforation repairing material in endodontic surgery (1, 2). MTA gained worldwide use after its approval by the Federal and Drug Administration in 1998, and it has shown excellent performance in both laboratory and clinical studies (1–8). Currently, MTA is also used for direct pulp capping (3, 6, 9), pulpotomy (10, 11), apexogenesis (12), one-visit apexification (13), and as a root canal filling material (14).

MTA is mainly composed of type 1 Portland cement plus bismuth oxide in a 4:1 ratio. Therefore, Portland cement has been investigated to evaluate whether it can be used as an alternative material. Previous studies have been reported that Portland cement has similar physical properties and behaviors (15, 16), chemical composition (17, 18), and biological responses (19, 20) to MTA. Although MTA has been recognized as a bioactive material and fulfilled many requirements of an ideal retrograde filling material, many disadvantages exist in both MTA and Portland cement, such as a delayed setting time ranging from 40 minutes to 72 hours (15, 21), difficulty of handling, and the high cost of MTA. Thus, many researchers are trying to develop a new cement by altering the composition of Portland cement to improve the material (22, 23).

One limitation of using MTA or Portland cement in clinical procedures is the extended setting time because of adding gypsum at the final stage of the manufacturing process (24). The gypsum is added to retard the setting time and improve cement's plasticity. The removal of gypsum allows rapid hardening and loss of plasticity known as flash set, which can be controlled by superplasticizing admixtures (25–27). Superplasticizer also can be added to manipulate viscosity and reduce the liquid-to-powder ratio while still maintaining workability in order to obtain high strength and durability (28).

Camilleri (25) found the setting time of Portland cement could be reduced by removing the gypsum from the manufacturing process without affecting its other properties. Superplasticizer was used to obtain a homogeneous flowable mix and control setting time ranging from 5 to 12 minutes. Although this material can be applied for dental usage, there are no studies to date concerning the effect of superplasticizer concentrations and liquid-to-powder ratios on properties of the cement. The purpose of this study was to determine whether polycarboxylate superplasticizer could be used with white Portland cement without gypsum to improve the long duration of setting time and flowability of the material.

Materials and Methods

Different concentrations (0%, 1.2%, 1.8%, and 2.4% by volume) of polycarboxylate superplasticizer (Sika [Thailand] Limited, Cholburi, Thailand), and liquid-to-powder ratios (0.27, 0.30, and 0.33 by weight) were tested with white Portland cement without gypsum (AWPC; Siam White Cement, Bangkok, Thailand). Type 1 ordinary white Portland cement (OWPC, Siam White Cement) plus distilled water at the same ratios of the experimental materials were used as the control groups. Protocols for both setting time and flowability tests were followed per ISO 6876:2001 (29).

Setting Time

The cylindrical dental plaster molds (1.0-mm height with a 10.0-mm diameter) were prepared, covered with moistened gauze, and kept in an incubator (37°C, 95% relative humidity) for 24 hours before testing. The experimental and control materials were mixed with different concentrations of polycarboxylate superplasticizer and liquid-to-powder ratios for 40 seconds at room temperature (23°C ± 1°C). Then, the samples were placed in the prepared cylindrical plaster molds.

A 2.0-mm diameter flat-end indenter was used with a 100-g load and carefully lowered vertically to the surface of the tested material. Then, the indenter tip was cleaned and repeated every 30 seconds until no indentation could be seen, determining the setting time.

All the setting times of the tested materials were determined in a temperature- and humidity-controlled chamber (37°C ± 1°C and 95% relative humidity) (Medical & Environmental Equipment Research Laboratory, Bangkok, Thailand). Five samples of material in each group were tested.

Flowability

After mixing the tested materials, a 0.05-mL sample was placed at the center of a glass slab (40 × 40 × 5 mm, 20-g weight). Then, another glass slab was placed on top of the material with an approximate 100-g load within 120 seconds. Ten minutes after the commencement of mixing, the load was removed, and the diameter was measured using a digital venier caliper. The maximum and minimum diameters were measured in case the sample was not complete circular formation. The means of the maximum and minimum diameters were recorded as the result. Five samples of material in each group were tested.

Statistical Analysis

The data were analyzed using SPSS (Statistical Package for the Social Sciences; SPSS Inc, Chicago, IL) with two-way analysis of variance to examine the effects of polycarboxylate superplasticizer concentration and liquid-to-powder ratio. Then, one-way analysis of variance ($p < 0.05$ and $p < 0.001$) was used to evaluate significant differences among experimental and control groups. Post hoc multiple comparisons tests were performed to determine differences between groups.

Results

Setting Time

The mean and standard deviation of the setting time of all samples are shown in Table 1. In all experimental groups, the setting times were in the range of 4.2 to 11.3 minutes, which are significantly ($p < 0.05$) lower than those obtained from the control groups (26.0-54.8 minutes).

TABLE 1. Setting Time of Experimental and Control Groups

Materials	Setting time (min) L/P = 0.33	L/P = 0.30	L/P = 0.27
OWPC + distilled (control)	54.8 ± 2.5	49.1 ± 1.8	26.0 ± 2.4
AWPC + distilled	8.5 ± 0.2*	5.5 ± 0.3*	4.2 ± 0.4*
AWPC + 1.2% PC	9.2 ± 0.2*	6.0 ± 0.2*	5.6 ± 0.1*
AWPC + 1.8% PC	9.8 ± 0.4*	7.1 ± 0.5*	6.2 ± 0.2*
AWPC + 2.4% PC	11.3 ± 0.2*	7.9 ± 0.2*	6.4 ± 0.2*

AWPC, white Portland cement without gypsum; L/P, liquid-to-powder ratio; OWPC, ordinary white Portland cement; PC, polycarboxylate superplasticizer (% by volume).

*$p < 0.05$.

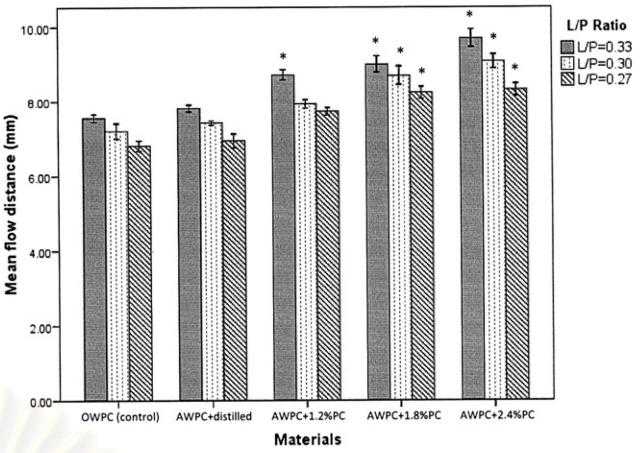


Figure 1. Flowability of the experimental and control groups. *$p < 0.001$.

Flowability

The results from the flowability testing are shown in Figure 1. The mean flows of AWPC plus 1.8% and 2.4% polycarboxylate superplasticizer groups were significantly increased ($p < 0.001$) at all liquid-to-powder ratios when compared with control groups. Significant differences between AWPC plus 1.2% polycarboxylate superplasticizer group and the control groups were observed only in a 0.33 liquid-to-powder ratio ($p < 0.001$).

Discussion

Portland cement consists of four mineral phases: C3S, tricalcium silicate (Ca_3SiO_5); C2S, dicalcium silicate (Ca_2SiO_4); C3A, tricalcium aluminate ($Ca_3Al_2O_6$); and C4AF, tetracalcium aluminoferrite ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$). A small amount of a high-purity grade of gypsum usually is ground up and added at the end of manufacturing process. By retarding the hydration of C3A, the gypsum controls the setting time and hardening rate of the cement when mixed with water (24, 27). Without the gypsum, the process of C3A hydration would cause the cement to set almost immediately with the evolution of considerable heat. This is known as flash set, which can be controlled by the use of superplasticizer admixtures (25–27).

Superplasticizers are high–molecular-weight anionic surfactants with a long hydrocarbon chain containing a high number of polar groups. When this material is absorbed by cement particles, the surfactant creates negatively charged particles that repulse each other. This action helps to disperse the cement particles and reduce clumping, lower the surface tension of the surrounding water considerably, and greatly enhance the fluidity of the cement (27). Furthermore, superplasticizers are preferred for their ability to improve cement physical properties (27, 30, 31), such as increasing the consistency and making cements more flowable and easier to place, achieving higher compressive strengths because of the lower L/P ratios, reducing exothermic heat during hydration and decreasing shrinkage as well as permeability.

The latest generation of superplasticizers is a comb-shaped polycarboxylate-based polymer consisting of one main linear chain with lateral carboxylate and ether groups. These comb-shaped molecules disperse cement particles in concrete mixes through more effective chemical mechanisms than earlier generations. Moreover, polycarboxylate-based superplasticizers do not affect the hydration of compositions (32).

In dentistry, polycarboxylate has been used in the form of polycarboxylate cement. Some studies reported successfully using polycarboxylate cement as a cavity liner in deep cavities (33) or direct pulp capping agent (34). Moreover, Camilleri et al (26) evaluated the

biocompatibility of MTA and accelerated Portland cement by examining cell metabolic function and proliferation and found that polycarboxylate superplasticizer did not compromise the biocompatibility of the Portland cements. Thus, the polycarboxylate superplasticizer may be used to improve some physical properties of MTA or Portland cement.

The results from this study showed a reduction of setting time in all the experimental groups, which might be beneficial for clinical approaches, such as direct pulp capping and vital pulp therapy procedures. Dental plaster molds were used in this study by the recommendation of the ISO 6876:2001 and ANSI/ADA Spec No. 57. The use of untreated plaster molds might be one of the factors reducing setting time because of water absorption from material. Thus, all molds in this study were covered with moist gauze and kept in 37°C and 95% relative humidity chambers for 24 hours before testing to establish a saturated state. Setting time tests were also operated in a temperature- and humidity-controlled chamber (37°C ± 1°C and 95% relative humidity). However, using a different method may affect the setting time reported. It should be noted that ISO 6876:2001 and ANSI/ADA Spec No.57 list different methods for setting time testing. For ISO 6876:2001, the setting time is recorded between the end of mixing and the time when the indenter needle fails to make any indentations on the surface of the material. With ANSI/ADA Spec No.57, the setting time is recorded between the start of mixing and the time when the indenter needle fails to make a complete indentation on the surface. Thus, the reported setting times from ANSI/ADA Spec No.57 are much lower than those from ISO 6876:2001. In our study, we found that the setting times of the experimental groups varied from 4.2 to 11.3 minutes and 2.6 to 4.7 minutes according to ISO 6876:2001 and ANSI/ADA Spec No.57, respectively (2.6 minutes is the ANSI/ADA Spec No.57 setting time of AWPC + distilled water at a liquid-to-powder ratio [L/P] = 0.27 group and 4.7 minutes is the ANSI/ADA Spec No.57 setting time of AWPC+2.4% polycarboxylate superplasticizer at L/P = 0.33 group; data are not shown in the result for the ANSI/ADA Spec No.57 test).

Mixing polycarboxylate superplasticizer and/or increasing liquid-to powder ratios also improved flowability of the cement. High liquid-to-powder ratios might be beneficial for releasing calcium hydroxide (35). However, the amount of water to use in mixing is limited because excessive water will cause an inappropriate consistency (35). The assessment of suitable polycarboxylate superplasticizer concentration and liquid-to-powder ratios is necessary for further development of this material.

Reducing the setting time and increasing flowability of the Portland cement would be beneficial for many aspects of clinical approaches, especially vital pulp therapy procedures. Direct pulp capping or partial pulpotomy with permanent restorations can be performed in one visit, reducing provisional restoration leakage and without requiring a second visit for the complete restoration. Further research into the study of other physical properties of the accelerated Portland cement including the temperature during setting, pH, compressive strength, and biocompatibility are crucial before the clinical usages.

Acknowledgments

The authors thank Dr Kevin Tompkins for his help in the preparation of this article.

The authors deny any conflicts of interest related to this study.

References

1. Torabinejad M, Watson TF, Pitt Ford TR. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. J Endod 1993;19:591–5.
2. Lee SJ, Monsef M, Torabinejad M. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate for repair of lateral root perforations. J Endod 1993;19:541–4.
3. Pitt Ford TR, Abedi HR, Bakland LK, et al. Using mineral trioxide aggregate as a pulp-capping materials. J Am Dent Assoc 1996;127:1491–4.
4. Koh ET, McDonald F, Pitt Ford TR, et al. Cellular response to mineral trioxide aggregate. J Endod 1998;24:543–7.
5. Accorinte Mde L, Holland R, Reis A, et al. Evaluation of mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide cement as pulp-capping agents in human teeth. J Endod 2008;34:1–6.
6. Bogen G, Kim JS, Bakland LK. Direct pulp capping with mineral trioxide aggregate: an observational study. J Am Dent Assoc 2008;139:305–15.
7. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review—part I: chemical, physical, and antibacterial properties. J Endod 2010;36:16–27.
8. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review–Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. J Endod 2010;36:400–13.
9. Torabinejad M, Chivian N. Clinical applications of mineral trioxide aggregate. J Endod 1999;25:197–205.
10. Barrieshi-Nusair KM, Qudeimat MA. A prospective clinical study of mineral trioxide aggregate for partial pulpotomy in cariously exposed permanent teeth. J Endod 2006;32:731–5.
11. Witherspoon DE, Small JC, Harris GZ. Mineral trioxide aggregate pulpotomies: a case series outcomes assessment. J Am Dent Assoc 2006;137:610–8.
12. El-Meligy OA, Avery DR. Comparison of mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide as pulpotomy agents in young permanent teeth (apexogenesis). Pediatr Dent 2006;28:399–404.
13. El-Meligy OA, Avery DR. Comparison of apexification with mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide. Pediatr Dent 2006;28:248–53.
14. Bogen G, Kuttler S. Mineral trioxide aggregate obturation: a review and case series. J Endod 2009;35:777–90.
15. Islam I, Chng HK, Yap AU. Comparison of the physical and mechanical properties of MTA and portland cement. J Endod 2006;32:193–7.
16. Islam I, Chng HK, Yap AU. Comparison of the root-end sealing ability of MTA and Portland cement. Aust Endod J 2005;31:59–62.
17. Islam I, Chng HK, Yap AU. X-ray diffraction analysis of mineral trioxide aggregate and Portland cement. Int Endod J 2006;39:220–5.
18. Oliveira MG, Xavier CB, Demarco FF, et al. Comparative chemical study of MTA and Portland cements. Braz Dent J 2007;18:3–7.
19. Saidon J, He J, Zhu Q, et al. Cell and tissue reactions to mineral trioxide aggregate and Portland cement. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2003;95:483–9.
20. Ribeiro DA, Duarte MA, Matsumoto MA, et al. Biocompatibility in vitro tests of mineral trioxide aggregate and regular and white Portland cements. J Endod 2005;31:605–7.
21. Sluyk SR, Moon PC, Hartwell GR. Evaluation of setting properties and retention characteristics of mineral trioxide aggregate when used as a furcation perforation repair material. J Endod 1998;24:768–71.
22. Hsieh SC, Teng NC, Lin YC, et al. A novel accelerator for improving the handling properties of dental filling materials. J Endod 2009;35:1292–5.
23. Kao CT, Shie MY, Huang TH, et al. Properties of an accelerated mineral trioxide aggregate-like root-end filling material. J Endod 2009;35:239–42.
24. Neville A. Properties of concrete. 3rd ed. London: The English Language Book Society and Pittman Publishing; 1981:1–19.
25. Camilleri J. The physical properties of accelerated Portland cement for endodontic use. Int Endod J 2008;41:151–7.
26. Camilleri J, Montesin FE, Di Silvio L, et al. The chemical constitution and biocompatibility of accelerated Portland cement for endodontic use. Int Endod J 2005;38:834–42.
27. Mehta PM, Monteiro PJM. Concrete microstructure, properties, and materials. 3rd ed. New York: The McGraw-Hill Companies; 2006. 212–23, 281–94.
28. Zingg AFW, Holzer L, Pakusch J, et al. Interaction of polycarboxylate-based superplasticizers with cements containing different C_3A amounts. Cements Concrete Comp 2009;31:153–62.
29. International Organization for Standardization. Dental root canal sealing materials. ISO 6786; 2001.
30. Puertas F, Santos H, Palacios M, et al. Polycarboxylate superplasticizers admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. Adv Cement Res 2005;17:77–89.
31. Heikal M, Aiad I. Effect of polycarboxylate superplasticizer on hydration characteristics of cement pastes containing silica fume. Ceramic Silikaty 2006;50:5–14.
32. Lothenbach B, Winnefeld F, Figi R. The influence of superplasticizers on the hydration of portland cement. 12th International Congress on the Chemistry of Cement; July 8th-13th, 2007 Montréal, Canada2007. Available at: http://library.eawag-empa.ch/empa_publications_2007_open_access/EMPA20070145.pdf. Accessed January 16, 2010.
33. Hodosh M, Hodosh SH, Hodosh AJ. Maintenance of pulpal vitality using potassium nitrate-polycarboxylate cement cavity liner. Quintessence Int 1991;22:495–502.
34. McWalter GM, el-Kafrawy AH, Mitchell DF. Pulp capping in monkeys with a calcium-hydroxide compound, an antibiotic, and a polycarboxylate cement. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1973;36:90–100.
35. Fridland M, Rosado R. Mineral trioxide aggregate (MTA) solubilit and porosity with different water-to-powder ratios. J Endod 2003;29:814–7.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ทันตแพทย์นรชัย วงศ์กรเชาวลิต เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2526 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ และเข้าศึกษาต่อในคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาทันตแพทยศาสตร์บัณฑิตในปี พ.ศ. 2551

หลังสำเร็จการศึกษา ได้เข้ารับราชการเป็นทันตแพทย์ระดับ 4 ที่โรงพยาบาลลำ-ทับ อำเภอลำทับ จังหวัดกระบี่ในปี พ.ศ. 2551 ถึง 2552 และลาออกจากราชการเพื่อกลับภูมิลำเนาและเข้าศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาเอ็นโดดอนต์ ภาควิชาทันตกรรมหัตถการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ.2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย