# บทที่ 2

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### แนวคิดและทฤษฎี

เนื่องจากเนื้อเยื่อในของฟัน (dental pulp) และเนื้อเยื่อรอบรากฟัน (periradicular tissue) สามารถเชื่อมต่อกันได้ทางรูปลายรากฟัน (apical foramen) (Dammaschke *et al.*, 2005: 731 - 738) และทางคลองรากด้านข้าง (lateral canal) ดังนั้นเมื่อเกิดการติดเชื้อแบคทีเรียจากคลองรากฟัน (root canal) ไปจนถึงส่วนของเนื้อเยื่อรอบรากฟัน จึงเป็นสาเหตุให้เกิดรอยโรครอบรากฟัน (periradicular lesion )

จุดมุ่งหมายหลักของการรักษาคลองรากฟัน (nonsurgical root canal therapy) คือ การกำจัดเอาสิ่งระคายเคืองออกจากระบบคลองรากฟันและอุดคลองรากฟันอย่างสมบูรณ์ทั้งสามมิติ อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบคลองรากฟันมีความสลับซับซ้อน ดังนั้นในการรักษาคลองรากฟันจึงอาจทำความสะอาดได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้การรักษาคลองรากฟันล้มเหลวได้ ส่วนการรักษาคลองรากฟันซ้ำเป็นทางเลือกแรกและทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขเมื่อการรักษาคลองรากฟันในครั้งแรกล้มเหลว อย่างไรก็ตาม มีบางสภาวะที่เกิดเป็นข้อห้ามทำให้การรักษาคลองรากฟันโดยผ่านทางส่วนตัวฟัน (orthograde) ไม่สามารถทำได้ ซึ่งจากเหตุผลดังกล่าว งานศัลยกรรมเอ็นโดดอนติกส์ (surgical endodontics therapy) จึงเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ประกอบด้วย การเปิดแผ่นเหงือกเพื่อให้พบกับรากฟัน จากนั้นตัดส่วนปลายรากฟันออกประมาณ 3 มิลลิเมตร แล้วจึงทำการเตรียมส่วนปลายรากฟันให้เป็นคลาสวัน แควิตี้ (Class I cavity) และอุดย้อนปลายรากฟันด้วยวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน (retrograde filling material) (Torabinejad *et al.*, 1993: 591 - 595)

จุดมุ่งหมายหลักของการใส่วัสดุอุดย้อนปลายรากฟันนั้นหวังผลปิดรอยรั่วในส่วนปลายรากฟัน (apical seal) ซึ่งจะช่วยหยุดยั้งการรั่วของสิ่งระคายเคืองที่ยังคงเหลืออยู่จากภายในคลองรากฟันไม่ให้เข้าไปในส่วนของเนื้อเยื่อรอบรากฟัน ซึ่งคุณสมบัติการปิดรอยรั่วที่ปลายรากเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งเสริมให้งานศัลยกรรมเอ็นโดดอนติกส์ประสบความสำเร็จ (Harty *et al.*, 1970: 407 - 413) ดังนั้นการเลือกวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อความสำเร็จในงานศัลยกรรมเอ็นโดดอนติกส์ (Friedman, 1991: 97 - 107; Johnson, 1999: 398 - 404; Jou and Pertl, 1997: 555 - 561) โดยคุณสมบัติของวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันที่ได้อุดมคติได้แก่

1. ใช้งานง่าย (easy to manipulate)
2. มีความทึบรังสี (radiopaque)
3. ไม่ดูดซับ (non absorbable)

4. เนื้อเยื่อรอบรากฟันทนได้ดี (well tolerated by periradicular tissue)
5. ส่งเสริมให้เกิดการหาย (promote healing)
6. ยึดและปิดผนึกกับระบบคลองรากฟันได้ดีทั้งสามมิติ (adhere and seal the root canal system in three dimensions)
7. ไม่เป็นพิษ (nontoxic)
8. ยึดกับผนังคลองรากฟันที่ได้รับการเตรียมได้เป็นอย่างดี (adhere to dentinal wall of root end preparation)
9. เข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility)
10. มีเสถียรภาพเชิงมิติ (dimensional stability)
11. ไม่ไวต่อความชื้น (moisture insensitivity)

(Gartner and Dorn, 1992: 357 - 378; Torabinejad *et al.*, 1993: 591 - 595 )

จากคุณสมบัติที่กล่าวมา จึงมีการนำวัสดุหลายชนิดมาใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน ได้แก่

- กัตตาเปอร์ชา (Gutta percha)
- ซิงค์ออกไซด์ยูจินอล (Zinc oxide eugenol)
- วัสดุในกลุ่มแคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate) เช่น เควิต (Cavit®)
- คอมโพสิต เรซิน (Composite resin)
- ทองคำเปลว (Gold foil)
- กลาสไอโอโนเมอร์ (Glass ionomer)
- อมัลกัม (Amalgam)
- ซุปเปอร์อีบีเอ (Super EBA)
- ไออาร์เอ็ม (IRM)

(Guttman and Harrison, 1991: 230 - 263)

อย่างไรก็ตาม ไม่มีวัสดุใดที่มีคุณสมบัติของวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันครบตามอุดมคติ (Torabinejad *et al.*, 1993: 591 - 595)

อมัลกัมเคยถูกใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันมาเป็นเวลาหลายปี ซึ่งข้อเสียของอมัลกัม ได้แก่ เกิดการรั่วเริ่มต้น (initial leakage) การกัดกร่อนในภายหลัง (secondary corrosion) การปนเปื้อนของสารปรอทและดีบุก ไวต่อความชื้น ต้องการส่วนยึดติดต้านการหลุด (retentive

undercut) ในการเตรียมโพรง (cavity) ทำให้เนื้อเยื่ออ่อน (soft tissue) และเนื้อเยื่อแข็ง (hard tissue) ติดสี และยังพบการเกิดเศษของชิ้นส่วนของอมัลกัมกระจัดกระจาย (Gartner and Dorn, 1992: 357 - 378) เนื่องจากข้อเสียเหล่านี้ ในระยะต่อมาจึงพัฒนานำเอาวัสดุกลุ่มซิงค์ออกไซด์ยูจินอลเบสซีเมนต์ เช่น ซุปเปอร์อีบีเอ และไอาร์เอ็ม มาใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันขึ้น

ซุปเปอร์อีบีเอเป็นรีอินฟอสซิงค์ออกไซด์ซีเมนต์เบส (Reinforced zinc oxide cement based) ที่ประกอบด้วยยูจินอล (Eugenol) 32% และ อีทอคซีเบนโซอิก แอซิด (Etoxybenzoic acid; EBA) 68% (Aqrabawi, 2000: 266 - 268) อย่างไรก็ตามพบข้อเสียได้แก่ วัสดุจะไวต่อความชื้น ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อที่ยังมีชีวิต ละลายตัว และใช้งานค่อนข้างยากในทางคลินิก (Gartner and Dorn, 1992: 357 - 378)

มิเนอรัลไตรออกไซด์แอกกริเกต หรือ เอ็มทีเอ (Mineral trioxide aggregate; MTA) เป็นวัสดุบูรณะตัวใหม่ที่พัฒนามาจากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) โดยครั้งแรกมีการพัฒนาเอ็มทีเอขึ้นในมหาวิทยาลัยโลมาลินดา เพื่อใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟันในงานศัลยกรรมเอ็นโดดอนติกส์ (Abdullah *et al.*, 2002: 4001 - 4010; Torabinejad *et al.*, 1993: 591 - 595; Torabinejad *et al.*, 1995a: 349 - 353) และระยะต่อมาได้รับการรับรองโดยสหพันธ์ยา (Federal Drug Administration; FDA) ในประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นจึงผลิตออกจำหน่ายในรูปของโปรรูทเอ็มทีเอ (ProRoot® MTA) (Tulsa Dental Products, Tulsa, OK, USA) โดยเริ่มต้นผลิตออกมาในรูปของผงสีเทา และในปี ค.ศ. 2002 ได้ผลิตในรูปของผงสีขาวเพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลด้านความสวยงาม (Song *et al.*, 2006: 809 - 815)

เอ็มทีเอจะมีส่วนประกอบหลักเป็นพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ที่มีความละเอียดอยู่ในช่วง 4,500-4,600 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ($cm^2g^{-1}$) (Camilleri and Pitt Ford, 2006)

ส่วนประกอบหลักของเอ็มทีเอสีเทาตามผู้ผลิตกำหนดประกอบด้วย ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate; $3CaO\ SiO_2$) บิสมัทออกไซด์ (Bismuth oxide) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate; $2CaO\ SiO_2$) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate; $3CaO\ Al_2O_3$) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite; $4CaO\ Al_2O_3$) และ แคลเซียมซัลเฟตดีไฮเดรต (Calcium sulfate dehydrate) (Dammaschke *et al.*, 2005) โดยมีการศึกษารายงานความแตกต่างระหว่างเอ็มทีเอสีเทาและสีขาวพบว่า มีความเข้มข้นของอลูมิเนียม (Aluminium) แมกนีเซียม (Magnesium) และสารประกอบของธาตุเหล็ก (Iron compounds) ที่แตกต่างกัน (Asgary *et al.*, 2005: 101 - 103) โดยเอ็มทีเอสีเทาจะมีจำนวนธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบมากกว่าเอ็มทีเอสีขาวอย่างมีนัยสำคัญ (Song *et al.*, 2006: 809 - 815) นอกจากนั้นยังพบว่าเอ็มทีเอสีขาวจะไม่มีส่วนประกอบของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ที่ทำให้เกิดเป็นสีเทา (Camilleri *et al.*, 2005a: 297 - 303) แม้ว่าเอ็มทีเอทั้งสองรูปแบบจะมีส่วนประกอบแตกต่างกันบางประการ อย่างไรก็ตามเอ็มทีเอทั้งสองรูปแบบจะมีส่วนประกอบหลักที่คล้ายกัน โดยประกอบด้วยพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 75

เปอร์เซ็นต์ บิสมัทออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้วัสดุเกิดความทึบรังสี ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการวินิจฉัยทางภาพรังสี นอกจากนั้นยังประกอบด้วยยิปซัม (Gypsum) 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (Material safety data sheet, 1998)

ในปี ค.ศ. 2001 มีการผลิตเอ็มทีเอออกมาในรูปแบบใหม่ชื่อว่า เอ็มทีเอแองเจลัส (MTA-Angelus : Angelus Solucoes Odontologicas, Londrina, Brazil) ขึ้นในประเทศบราซิล มีส่วนประกอบหลักเป็น พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 80 เปอร์เซ็นต์ และบิสมัทออกไซด์ 20 เปอร์เซ็นต์ ( Song *et al.*, 2006: 809 - 815) โดยไม่เติมยิปซัมลงไปหวังผลลดระยะเวลาแข็งตัว

จากการศึกษาที่นำเอ็มทีเอไปวิเคราะห์ด้วยอิเล็คตรอนโพรบไมโครอนาไลสิส (electron probe microanalysis) พบว่าส่วนประกอบหลักคือแคลเซียม (Calcium) และฟอสฟอรัส (Phosphorous) และเนื่องจากสารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อเยื่อแข็งของฟัน (dental hard tissue) จึงคาดว่าเอ็มทีเออาจมีคุณสมบัติเข้ากันได้ทางชีวภาพเมื่อสัมผัสกับเซลล์และเนื้อเยื่อ (Torabinejad *et al.*, 1995b: 489 - 492) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Asgary และคณะ(2005: 101 – 103) ที่วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเอ็มทีเอสีเทาและสีขาว ด้วยอิเล็คตรอนโพรบไมโครอนาไลสิส กลับไม่พบฟอสฟอรัส และนอกจากนั้น Camilleri และคณะ (2005a: 297 - 303) ยังแสดงให้เห็นว่าเอ็มทีเอ (ProRoot® MTA) ไม่มีฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบ จึงคาดว่าตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาของ Torabinejad และคณะน่าจะเกิดการปนเปื้อนจากการแช่ไว้ในสารละลายฟอสเฟต (Phosphate solution) ก่อนนำมาทดสอบ

การผสมเอ็มทีเอกับน้ำพบว่า เมื่อเติมน้ำลงไปในเอ็มทีเอ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายไปเป็นซิลิเกตไฮเดรตเจล (silicate hydrate gel) (Camilleri and Pitt Ford, 2006: 747 - 754)

คุณสมบัติทางกายภาพของเอ็มทีเอเมื่อเทียบกับอมัลกัม ไออาร์เอ็ม และซุปเปอร์อีบีเอพบว่าค่าความเป็นกรด - เบส (pH value) ของเอ็มทีเอหลังจากผสมเสร็จทันทีจะมีค่า 10.2 และจะเพิ่มเป็น 12.5 เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะคงที่ เนื่องจากเอ็มทีเอมีค่าความเป็นกรด - เบสสูงคล้ายกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide; $Ca(OH)_2$) จึงอาจมีส่วนเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็งขึ้นได้ เมื่อใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน นอกจากนั้นยังพบว่าเอ็มทีเอจะมีความทึบรังสีเท่ากับอลูมิเนียมสเต็ปเวดจ์ (aluminium stepwedge) ที่มีความหนาเท่ากับขั้นที่ 7.17 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่ากัตตาเปอร์ชาและเนื้อฟัน (dentine) จึงแยกความแตกต่างทางภาพรังสีได้ง่ายเมื่อใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน เอ็มทีเอมีเวลาแข็งตัว (setting times) เฉลี่ย 2 ชั่วโมง 45 นาที ( ± 5 นาที) นอกจากนั้นยังพบว่าความทนแรงอัด (compressive strength) ของเอ็มทีเอจะคล้ายกับซุปเปอร์อีบีเอ ไออาร์เอ็ม และซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ โดยความทนแรงอัดที่ 24 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 40.0 ± 4.4 เมกกะปาสคาล (Megapascal; MPa) และที่ 21 วัน เท่ากับ 67.3 ± 6.6 เมกกะปาสคาล ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความทนแรงอัดของเอ็มทีเอนี้ต้องอาศัยความชื้นเข้ามามีส่วนร่วมด้วย และไม่พบ

การละลายตัวของเอ็มทีเอเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน 7 วัน และ 21 วัน ซึ่งคล้ายกับวัสดุตัวอื่นที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ (Torabinejad *et al.*, 1995a: 349 - 353)

เริ่มแรกเอ็มทีเอถูกนำมาใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน และทำหน้าที่ในการปิดผนึกทางเชื่อมต่อระหว่างระบบคลองรากฟันและอวัยวะปริทันต์เฉพาะในงานศัลยกรรมเอ็นโดดอนติกส์ (Ford *et al.*, 1995: 756 - 763; Torabinejad *et al.*, 1993: 591 - 595; Torabinejad *et al.*, 1994: 159 - 163) จากคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ ต่อมาจึงนำมาใช้ในการรักษาเพื่อคงความมีชีวิตของเนื้อเยื่อในไว้ (vital pulp therapy) (Aeinehchi *et al.*, 2003: 225 - 231; Ford *et al.*, 1996: 1491 - 1494; Menezes *et al.*, 2004: 376 - 379) ใช้ในกระบวนการเหนี่ยวนำให้ปลายรากปิด (apexification) (Hayashi *et al.*, 2004: 120 - 122; Shabahang *et al.*, 1999: 1 - 5) ซ่อมรากทะลุ (repair of root perforation) (Ferris and Baumgartner, 2004: 422 - 424; Ford *et al.*, 1995: 756 - 763; Main *et al.*, 2004: 80 - 83; Nakata *et al.*, 1998: 184 - 186) นอกจากนั้นยังใช้เป็นตัวกั้น (barrier) ในการฟอกสีฟันภายใน (internal bleaching) และใช้ซ่อมการสูญสลายของรากฟัน (root resorption) ที่เกิดขึ้นด้วย เนื่องจากเอ็มทีเอเป็นไฮดรอลิกซีเมนต์ที่แข็งตัวได้เมื่อผสมกับน้ำและสามารถปล่อยแคลเซียมได้ (Fridland and Rosado, 2003: 814 - 817)

ปัจจุบันนิยมนำเอ็มทีเอมาใช้ในงานรักษาทางเอ็นโดดอนติกส์มากขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุอื่นได้แก่ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพทั้งในหลอดแก้ว และในร่างกายที่มีชีวิต (Koh *et al.*, 1997: 432 - 439; Koh *et al.*, 1998: 543 - 547; Mitchell *et al.*, 1999: 167 - 173; Torabinejad *et al.*, 1995b: 489 - 492; Torabinejad *et al.*, 1995g: 569 - 571; Torabinejad *et al.*, 1997: 225 - 228; Zhu *et al.*, 2000: 404 - 406) ความสามารถในการปิดรอยรั่ว (sealing ability) (Adamo *et al.*, 1999: 197 - 203; Fischer *et al.*, 1998: 176 - 179; Torabinejad *et al.*, 1993: 591 - 595; Torabinejad *et al.*, 1995c: 109 - 112; Torabinejad *et al.*, 1995f: 295 - 299; Wu *et al.*, 1998: 557 - 560) และยังส่งเสริมการเกิดใหม่ของเนื้อเยื่อรอบรากฟันด้วย (regeneration of the periradicular tissues) (Shabahang *et al.*, 1999: 1 - 5) โดยมีคุณสมบัติเป็นไปตามที่กำหนดไว้ ได้แก่ คุณสมบัติต้านจุลชีพ (antimicrobial effect) (Stowe *et al.*, 2004: 429 - 431; Torabinejad *et al.*, 1995d: 403 - 406) ความทึบรังสี เสถียรภาพเชิงมิติ และทนต่อความชื้น อย่างไรก็ตามเอ็มทีเอยังมีข้อเสียคือเวลาแข็งตัวนาน และราคาที่ค่อนข้างแพง (Camilleri *et al.*, 2005b: 834 - 842)

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เป็นไฮดรอลิกซีเมนต์ที่มีไฮดรอลิกแคลเซียมซิลิเกต (Hydraulic calcium silicates) เป็นส่วนประกอบหลัก เป็นวัสดุที่ได้จากการเผาส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ หินปูน (limestone) ดิน ปูนขาว (marl) ดินเหนียว และหินดาน (Shale) (ประณต, 2536: 17 - 29) โดยมีส่วนประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบหลักของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (มอก.15 เล่ม 1-2532 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ กระทรวงอุตสาหกรรม)

| ชื่อทางเคมี (Chemical Name) | สูตรทางเคมี (Chemical Formula) | เครื่องหมายชวเลข (Shorthand Notation) | ร้อยละโดยน้ำหนัก (Percent by Weight) |
|---|---|---|---|
| ไตรแคลเซียมซิลิเกต | $3CaOxSiO_2$ | $C_3S$ | 54 |
| ไดแคลเซียมซิลิเกต | $2CaOxSiO_2$ | $C_2S$ | 16 |
| ไตแคลเซียมอลูมิเนต | $3CaOxAl_2O_3$ | $C_3A$ | 11 |
| เตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอไรต์ | $4CaOxAl_2O_3xFe_2O_3$ | $C_4AF$ | 9 |
| ยิปซัม | $CaSO_4xH_2O$ | $CSH_2$ | 10 |

โดยปกติพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ สีขาวและสีเทา โดยทั้งสองรูปแบบจะมีคุณสมบัติที่คล้ายกันยกเว้นสี ซึ่งจะขึ้นกับวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิต

เมื่อผสมพอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration of cement) โดยสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต หรือไตรแคลเซียมซิลิเกตที่อยู่ในผงปูน จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตเจล มีคุณสมบัติในการประสาน เหนียวคล้ายกาว แข็งตัว และยึดกับวัสดุผสมทำให้มีความแข็งแรง และเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีคุณสมบัติเป็นด่าง และอาจทำปฏิกิริยาต่อไปกับอลูมินาได้สารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (calcium aluminate hydrate)

คุณสมบัติทางกายภาพเกี่ยวกับระยะเวลาแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว (White Portland cement) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เวลาแข็งตัวของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว (มอก.133-2518 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ขาว กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541)

| วิธีทดสอบ (Test Method) | ชนิดการแข็งตัว (Set Type) | ระยะเวลาตามเกณฑ์กำหนด (Time Specification) |
|---|---|---|
| การทดสอบแบบไวแคต (Vicat) | ระยะเวลาเริ่มต้นแข็งตัว (Initial) | $\geq$ 45 นาที (Minutes) |
| | ระยะเวลาแข็งตัวเต็มที่ (Final) | $\leq$ 480 นาที (8 ชั่วโมง) |
| การทดสอบแบบกิลมอร์ (Gillmore) | ระยะเวลาเริ่มต้นแข็งตัว | $\geq$ 60 นาที |
| | ระยะเวลาแข็งตัวเต็มที่ | $\leq$ 600 นาที (10 ชั่วโมง) |

ส่วนคุณสมบัติเกี่ยวกับความทนแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความทนแรงอัดของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว (มอก.133-2518 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ขาว กระทรวงอุตสาหกรรม, 2541)

| ระยะเวลา (Cure times) | ความทนแรงอัด (MPa/N) |
|---|---|
| 1 day | - |
| 3 days | 8.3 (85) |
| 7 days | 14.8 (150) |
| 28 days | - |

ปัจจุบันยังไม่มีการนำพอร์ตแลนด์ซีเมนต์เข้ามาพัฒนาใช้ในทางทันตกรรม ดังนั้นการนำเอาพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ซึ่งมีคุณใกล้เคียงกับเอ็มทีเอมาพัฒนาใช้ในทางทันตกรรม น่าจะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากมีราคาไม่แพง แม้ว่าคุณสมบัติบางอย่าง เช่น ความทึบรังสีของ

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะต่ำกว่าเอ็มทีเอ อย่างไรก็ตามสามารถพัฒนาคุณสมบัติความทึบรังสีให้ใกล้เคียงกับเอ็มทีเอได้ โดยการเติมบิสมัทออกไซด์ โดยบิสมัทออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองไม่มีกลิ่น ประกอบด้วยโลหะบิสมัท 2 อะตอม และออกซิเจน 3 อะตอม มีจุดหลอมเหลว (Melting Point) 825 องศาเซลเซียส (°C) และจุดเดือด (Boiling Point) 1,890 องศาเซลเซียส มีความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 8.9 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ($g/cm^3$) มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight) 465.96 และไม่ละลายน้ำ (Dierks, Oct 2002) เนื่องจากบิสมัทมีความเป็นพิษต่ำ และไม่เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ดังนั้นจึงนำมาใช้แทนตะกั่วในส่วนผสมของวัสดุหลายชนิด เช่น ท่อน้ำโลหะอัลลอยด์ (Metal alloy) เป็นต้น สารประกอบบิสมัทยังใช้ประโยชน์เป็นส่วนผสมในยารักษาโรคกระเพาะ (Pepto-bismol®) เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางและครีมต่างๆ นอกจากนี้ยังมีการนำบิสมัทออกไซด์มาผสมในวัสดุทางการแพทย์ เช่น กระดูกเทียม ไหมเย็บ เครื่องมือทางศัลยกรรมบางชนิด เพื่อให้สามารถมองเห็นได้จากภาพถ่ายรังสี จากคุณสมบัติความทึบรังสีของบิสมัทออกไซด์ทำให้มีบทบาทอย่างมากในทางการแพทย์ เนื่องจากปัจจุบันมีการผลิตในรูปนาโนคริสตัลบิสมัทออกไซด์ (Nanocrystalline Bismuth Oxide) ด้วยนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ทำให้ผลึกของบิสมัทออกไซด์มีขนาดเล็กมาก

จากการศึกษาของ Camilleri และคณะ นำเอาบิสมัทออกไซด์ไปสัมผัสกับเซลล์สร้างกระดูก (Saos-2 osteosarcoma) จากนั้นเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และศึกษารูปร่างของเซลล์ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเซลล์ดังกล่าวไม่สามารถเจริญเติบโตได้บนบิสมัทออกไซด์ นั่นแสดงถึงการไม่ยอมรับของเนื้อเยื่อต่อบิสมัทออกไซด์ แต่เซลล์ที่สัมผัสกับเอ็มทีเอทั้งสีเทาและสีขาวที่มีส่วนประกอบของบิสมัทออกไซด์นี้ยังคงสามารถเจริญเติบโตได้เมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน แสดงว่าปริมาณบิสมัทออกไซด์ที่มีในเอ็มทีเอเป็นปริมาณที่เนื้อเยื่อยังคงยอมรับได้ (Camilleri *et al.*, 2004: 699 - 704 )

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ (chemical composition and physical properties)

การศึกษาเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีและลักษณะสัณฐานวิทยาที่พบว่า พอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีส่วนประกอบคล้ายกับเอ็มทีเอสีเทา (Loma Linda University, Loma Linda, CA, USA) นั้นเริ่มต้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1999 โดย Wucherpfennig and Green (1999: 557 - 560) พบว่าเอ็มทีเอจะมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้งขนาดเล็ก (microscopic) และขนาดใหญ่ (macroscopic) คล้ายกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ นอกจากนั้น Estrela และคณะ (2000: 3 - 9) รายงานว่า เอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีส่วนประกอบที่คล้ายกันยกเว้นบิสมัทออกไซด์ ซึ่งเติมเข้าไปในเอ็มทีเอเพื่อหวังผลเพิ่มความทึบรังสี

Funteas และคณะ (2003: abstract) วิเคราะห์ตัวอย่างของเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดยดูองค์ประกอบของธาตุ (element) ด้วยวิธีอินดัคทีฟลี ดับเพิ้ล พลาสมา อิมิสชัน สเปคโทรเมทรี (Inductively Doupled Plasma Emission Spectrometry; ICP-ESO) ผลการศึกษาพบว่ามีธาตุที่คล้ายกันยกเว้นไม่พบบิสมัทออกไซด์ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์

Camilleri และคณะ (2005b: 834 - 842) ศึกษาเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีและความเข้ากันได้ทางชีวภาพของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีเทาและสีขาว เอ็มทีเอสีเทาและสีขาว และแอคซีลีเรตเตดพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Accelerated Portland cement; APC) โดยใช้อิเนอร์จีดิสเพอร์สีพอนาไลสิสบายเอกซ์เรย์ (Energy Dispersive Analysis by X - ray; EDAX) และเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันอนาไลสิส (X - ray diffraction analysis; XRD) วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี และทดสอบคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการทดสอบโดยทางตรง (direct test method) และวิธีการทดสอบโดยทางอ้อม (indirect test method) ผลการศึกษาพบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และเอ็มทีเอจะมีแร่ธาตุที่คล้ายกัน ยกเว้นบิสมัทออกไซด์จะพบได้เฉพาะในเอ็มทีเอ และไม่พบความเป็นพิษของเอ็มทีเอทั้งสีเทาและสีขาว นอกจากนั้นยังพบว่าการเติมบิสมัทออกไซด์เข้าไปในแอคซีลีเรตเตดพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ไม่มีผลรบกวนคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

Song และคณะ (2006: 809 - 815) ประเมินส่วนประกอบทางเคมี และโครงสร้างคริสตัล (crystalline structures) ของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โปรรูทเอ็มทีเอสีเทา โปรรูทเอ็มทีเอสีขาว และเอ็มทีเอแองเจลัสสีเทาโดยใช้เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X - ray diffraction; XRD) และใช้อิเนอร์จีดิสเพอร์สีพเอกซ์เรย์สเปคโทรมิเตอร์ (Energy Dispersive X - ray Spectrometer; EDS) จำแนก (identify) บอกลักษณะคริสตัลเฟส (crystalline phase) และวัดส่วนประกอบทางเคมีทั้งในส่วนผงและรูปแบบแข็งตัว (set form) ผลการศึกษาพบว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีส่วนประกอบต่างจากเอ็มที

เอตรงที่ไม่พบมีบิสมัทไอออน ขณะที่พบมีโพแทสเซียมไอออน นอกจากนั้นเอ็มทีเอสีเทาจะมีปริมาณของไอออนมากกว่าเอ็มทีเอสีขาวด้วย

Duarte และคณะ (2005: 648 - 650) วัดการหลั่งของสารหนู (arsenic) จากพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีเทา 2 ชนิด พอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว และเอ็มทีเอ 2 ชนิด (โปรรูทเอ็มทีเอ และเอ็มทีเอแองเจลัส) โดยใช้การวัดการดูดซับอะตอม (atom absorption spectrophotometry) ผลการศึกษาพบสารหนูทั้งในเอ็มทีเอและพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณต่ำมาก

Islam และคณะ (2006a: 220 - 225) เปรียบเทียบส่วนประกอบหลักที่พบในเอ็มทีเอสีเทาและสีขาว และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีเทาและสีขาวโดยใช้เพาเวอร์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรเมทรี (Power X - ray diffractrometry) ผลการศึกษาพบว่าตัวอย่างการศึกษาทั้ง 4 ตัวอย่างมีส่วนประกอบหลักที่คล้ายกัน

นอกจากนั้น Islam และคณะ (2006b: 193 – 197) ยังประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ โดยเปรียบเทียบความเป็นกรด - เบส ความทึบรังสี ระยะเวลาแข็งตัว ความสามารถในการละลาย การเปลี่ยนแปลงเชิงมิติ (dimensional change) และความทนแรงอัดของเอ็มทีเอสีเทาและสีขาว พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ปกติ (Ordinary Portland cement) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว ผลการศึกษาพบว่าส่วนประกอบหลักของเอ็มทีเอคือพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และยังแสดงให้เห็นว่าเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกันจึงเสนอแนวทางในการนำเอาพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาใช้เป็นวัสดุอุดย้อนปลายรากฟัน

Danesh และคณะ (2006: 213 – 219) เลือกศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพบางประการโดยศึกษาเปรียบเทียบในเรื่องของการละลายตัว ไมโครฮาร์ดเนส (Microhardness) และความทึบรังสีของโปรรูทเอ็มทีเอกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 2 ชนิด คือ ซีอีเอ็มวัน และ ซีอีเอ็มทู (CEM I และ CEM II) ผลการศึกษาพบว่าหลังจาก 28 วันเอ็มทีเอจะมีการละลายตัวต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิด ส่วนไมโครฮาร์ดเนส (microhardness) ของเอ็มทีเอจะมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั้งสองชนิด และนอกจากนั้นยังพบว่าเอ็มทีเอจะมีความทึบรังสีมากที่สุด รองลงมาเป็นซีอีเอ็มวัน และซีอีเอ็มทู ตามลำดับ จากการศึกษาสรุปว่าเอ็มทีเอเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหนือกว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั้งสองชนิด

Dammaschke และคณะ (2005: 731 – 738) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางภาพในส่วนพื้นผิว (chemical and physical surface) และคุณสมบัติในรูปแบบสามมิติ (bulk properties) ของโปรรูทเอ็มทีเอสีขาวเทียบกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ 2 ชนิด โดยใช้เอกซ์เรย์โฟโตอิเล็คตรอนสเปคโทรสโคปี (x - ray photoelectron spectroscopy; XPS) และอิเนอร์จีดิสเพอร์สีพเอกซ์เรย์อนาไลสิส (Energy-dispersive X - ray analysis; EDX) วิเคราะห์แร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก และใช้อินดัคทีฟลีคัพเพิ้ลพลาสมาออพติคัลอิมิชชันสเปคโทรสโคปี (Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy; ICP-OES) วิเคราะห์ส่วนประกอบรอง รวมทั้งใช้กล้องจุลทรรศน์

อิเล็คตรอนชนิดส่องกราด วิเคราะห์สัณฐานวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป (morphologic change) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประกอบด้วยอนุภาค (particles) ที่มีขนาดใหญ่ ขณะที่โปรรูทเอ็มทีเอจะมีลักษณะเป็นแบบฉบับ (uniform) และมีขนาดของอนุภาคที่เล็กกว่า และยังพบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโปรรูทเอ็มทีเอ จะมีความบริสุทธิ์มากกว่า จากการศึกษาดังกล่าวจึงสรุปว่าไม่สามารถใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์มาแทนเอ็มทีเอได้ เนื่องจากแม้ว่าจะมีส่วนประกอบ และคุณสมบัติทางกายภาพบางประการที่คล้ายคลึงกันแต่ไม่เท่ากัน

**คุณสมบัติทางชีวภาพ (Biological properties)**

สำหรับคุณสมบัติทางชีวภาพ มีการศึกษาที่บ่งชี้ว่าทั้งเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดย Abdullah และคณะ (2002: 4001 – 4010) ศึกษาคุณสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการของกลาสไอโอโนเมอร์ เอ็มทีเอ แอกซีลีเรตเตตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติ (Unmodified Portland cement; RC) โดยการทำไดเรคคอนแทคเอสเส (direct contact assay) การสังเกตดูไซโตมอร์โฟโลจี (cytomorphology) ของเอสเอโอทูออสทิโอซาโคมาเซลล์ (SaO-2 osteosarcoma cells) เมื่อสัมผัสกับวัสดุที่ทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด และดูผลกระทบของวัสดุเหล่านี้ต่อการแสดงออกของสิ่งที่เป็นเครื่องหมาย (markers) สำหรับการปรับรูปของกระดูก (bone remodeling) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแอกซีลีเรตเตตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทั้ง 2 ชนิดไม่มีความเป็นพิษ และอาจมีส่วนช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดการหายของกระดูกได้ ดังนั้นต่อมา Saidon และคณะ (2003: 483 – 489) ศึกษาการตอบสนองของเซลล์และเนื้อเยื่อต่อเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยทำการเลี้ยงเซลล์ (cell culture) และฝังชิ้นส่วนของวัสดุเข้าไปในช่องกระดูก (bone cavities) ในขากรรไกรล่างของหนูกุยเนียพิก (Guinea pig) ผลการศึกษาไม่พบการตอบสนองของเซลล์ที่แตกต่างกันในทางห้องปฏิบัติการ โดยจะเกิดการหายของกระดูก และมีการตอบสนองต่อการอักเสบเพียงเล็กน้อยในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับโปรรูทเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ฝังลงไป จึงเสนอแนะว่าร่างกายสามารถทนต่อวัสดุทั้งสองประเภทได้ดี และยังเป็นการยืนยันถึงความคล้ายกันระหว่างพอร์ตแลนด์ซีเมนต์และเอ็มทีเอ

Ribeiro และคณะ ( 2005: 605 – 607) ประเมินความเป็นพิษต่อสารพันธุกรรม (genotoxic) และความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxic) ของเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ในทางห้องปฏิบัติการโดยใช้อัลคาไลด์ซิงเกิลเซลล์เจลเอสเส (Alkaline single cell gel (comet) assay) และการทดสอบไทรแพนบลูเอ็กซ์คลูชัน (Trypan blue exclusion test) กับเซลล์ลิมโฟมา (Lymphoma cells) ของหนู ผลการศึกษาพบว่าการการทดสอบเซลล์ด้วยเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะไม่พบความเป็นพิษเกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไม่ได้ผลิตสารที่เป็นพิษต่อสารพันธุกรรม (genotoxins) และไม่มีผลเหนี่ยวนำให้เกิดการตายของเซลล์ด้วย

Menezes และคณะ (2004: 376 – 379) ศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองของเนื้อเยื่อในฟัน (dental pulp) ของสุนัข หลังจากทำการตัดเนื้อเยื่อในออก (pulpotomy) และการรักษาเพื่อป้องกันเนื้อเยื่อในโดยตรง (direct pulp protection) ด้วย เอ็มทีเอแองเจลัส โปรรูทเอ็มทีเอ พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาว ผลการศึกษาพบว่าวัสดุเกือบทุกตัวให้ผลดีคล้ายกันเมื่อใช้เป็นวัสดุปิดทับเนื้อเยื่อในโดยตรง (pulp-capping materials) และพบว่าในตัวอย่างทั้งหมดยังมีเนื้อเยื่อในที่ยังมีชีวิตอยู่ ซึ่งส่งเสริมให้เกิดการหายด้วยการเกิดเป็นเนื้อเยื่อแข็งเชื่อมประสานกัน (hard tissue bridge) จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถใช้การรักษาเพื่อป้องกันเนื้อเยื่อในได้

De Deus และคณะ ( 604 – 609) ประเมินดูผลความเป็นพิษของเอ็มทีเอทั้ง 2 บริษัท (ปรรูทเอ็มทีเอ และเอ็มทีเอแองเจลัส) และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ต่อเซลล์เอนโดทีเรียลของมนุษย์ที่เป็นเซลล์มาตรฐาน (human ECV 304 endothelial cell line) โดยการใช้ไดเมทิลไทอะโซไดฟีนิลเตตระโซเลียมโบรไมด์ (dimethyl-thiazoldipheny tetrazolium bromide assay) วัดความมีชีวิตของเซลล์ ผลการศึกษาไม่พบความแตกต่างระหว่างวัสดุที่นำมาศึกษาอย่างมีนัยสำคัญ สรุปได้ว่าเอ็มทีเอทั้ง 2 บริษัท รวมทั้งพอร์ตแลนด์ซีเมนต์โดยเริ่มต้นจะมีความเป็นพิษอยู่บ้าง แต่ความเป็นพิษจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป

Holland และคณะ (2001a: 3 – 8; 2001b: 109 – 113) ศึกษาวิเคราะห์ ในท่อเนื้อฟัน (dentine tubes) ที่อุดด้วยเอ็มทีเอ และพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการฝังเข้าไปในชั้นใต้ผิวหนัง (Subcutaneous tissue) ของหนู และเปรียบเทียบพฤติกรรมของวัสดุทั้ง 2 ชนิดในเนื้อเยื่อในฟันของสุนัข หลังจากตัดเนื้อเยื่อในออก ผลการศึกษาพบว่าทั้งพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และโปรรูทเอ็มทีเอมีคุณสมบัติเข้ากันได้ทางชีวภาพที่คล้ายกัน

จากเอกสารอ้างอิงและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมา ยังไม่มีการศึกษาใดที่ศึกษาเกี่ยวกับพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวที่ผลิตในประเทศไทยผสมกับบิสมัทออกไซด์ จึงเป็นที่น่าสนใจว่าส่วนประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์สีขาวที่ผลิตในประเทศไทย เมื่อผสมกับบิสมัทออกไซด์แล้วอาจคล้ายกับเอ็มทีเอที่ใช้งานในทางทันตกรรมอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นวัสดุนำเข้า และมีราคาแพง เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและนำมาใช้ต่อไป