

การแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความผันแปรของความหนาโลหะและพอร์ซเลน

นางสาว ธิดารัตน์ อังวรารวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3468-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE FRACTURE OF PORCELAIN ON THE VARIED THICKNESS OF METAL AND PORCELAIN  
SAMPLE

Ms. Thidarat Angwarawong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Sciences Program in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

ISBN 974-14-3468-5

Copyright of Chulalongkorn University



ธิดารัตน์ อังวรารัง : การแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความผันแปรของความหนาโลหะและพอร์ซเลน. (THE FRACTURE OF PORCELAIN ON THE VARIED THICKNESS OF METAL AND PORCELAIN SAMPLE) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ทพ. ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย, 95 หน้า. ISBN 974-14-3468-5.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลน โดยทำการทดสอบชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องขนาด  $7 \times 9$  มม.<sup>2</sup> ที่มีความหนาของโลหะคงที่ 0.3 มม. แต่มีความหนาของพอร์ซเลนต่างกัน คือ 0.7 มม. 1.35 มม. 2.0 มม. 2.65 มม. และ 1.3 มม. (กลุ่มที่ 1-5 ตามลำดับ) และชิ้นงานที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.0 มม. แต่มีความหนาของโลหะต่างกัน คือ 0.3 มม. 0.1 มม. 0.2 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. (กลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11 ตามลำดับ) กลุ่มละ 10 ชิ้น โดยเตรียมขึ้นตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต นำชิ้นงานที่ได้มายึดบนแป้นทองเหลืองด้วยซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่น 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบด้วยแรงอัดในแนวตั้งตรงตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานจนพอร์ซเลนแตก ด้วยเครื่องทดสอบสากลรุ่น Instron 8872 ที่มีหัวกดรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ความเร็วหัวกด 1 มม./ นาที ผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $X \pm S.D.$ ) ของแต่ละกลุ่มมีค่าดังนี้ 1) 2396.23  $\pm$  580.31 N 2) 2644.93  $\pm$  373.05 N 3) 2629.19  $\pm$  282.66 N 4) 2436.32  $\pm$  312.34 N 5) 2352.82  $\pm$  257.13 N 6) 1551.14  $\pm$  682.92 N 7) 2189.71  $\pm$  448.62 N 8) 2565.61  $\pm$  217.44 N 9) 2722.25  $\pm$  247.08 N 10) 2450.60  $\pm$  242.15 N และ 11) 2611.42  $\pm$  333.15 N เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์โดยใช้สถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวและการทดสอบการเปรียบเทียบเชิงซ้อนชนิดแทมเฮนสรุปผลได้ว่า กลุ่มที่ 1-5 จะมีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ส่วนกลุ่มที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.0 มม. แต่มีความหนาของโลหะแตกต่างกัน กลุ่มที่โลหะหนา 0.1 มม. จะมีค่าเฉลี่ยของแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักต่ำที่สุดและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) กับกลุ่มที่โลหะมีความหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. ขณะที่กลุ่มที่มีโลหะหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) และกลุ่มที่มีโลหะหนา 0.20 มม. มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) กับกลุ่มอื่นๆ ที่มีโลหะหนาต่างกัน

ภาควิชา ทัศนกรรมประดิษฐ์  
สาขาวิชา ทัศนกรรมประดิษฐ์  
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_



## 4776112032 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEY WORD: FRACTURE OF PORCELAIN / METAL CERAMIC RESTORATION / THICKNESS OF METAL / THICKNESS OF PORCELAIN

THIDARAT ANGWARAWONG: THE FRACTURE OF PORCELAIN ON THE VARIED THICKNESS OF METAL AND PORCELAIN SAMPLE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PANUPONG WONGTHAI, 95 pp. ISBN 974-14-3468-5.

The objective of this research was to study the porcelain fracture load of the varied thickness of metal and porcelain sample. The metal ceramic samples, 7 x 9 mm<sup>2</sup> rectangular, were fabricated with constant metal thickness of 0.3 mm but varied porcelain thickness of 0.7, 1.35, 2.0, 2.65 and 3.3 mm (group 1-5, respectively) and with constant porcelain thickness of 2.0 mm but varied metal thickness of 0.3, 0.1, 0.2, 0.4, 0.7, 1.0 and 1.3 mm (group 3 & 6-11, respectively). Ten samples of each group were prepared following manufacturer's recommendations. Each sample was fixed to the supporting brass block with zinc phosphate cement. The bonded samples were stored at 37 °C in water for 24 hours. The sample was loaded at the center of the porcelain surface until fracture. Using an Instron universal testing machine model 8872 with a round carbide pin of 3 mm diameter stainless steel and at the crosshead speed of 1 mm/min. The means ± S.D. of each group was by follow; 1) 2396.23 ± 580.31 N 2) 2644.93 ± 373.05 N 3) 2629.19 ± 282.66 N 4) 2436.32 ± 312.34 N 5) 2352.82 ± 257.13 N 6) 1551.14 ± 682.92 N 7) 2189.71 ± 448.62 N 8) 2565.61 ± 217.44 N 9) 2722.25 ± 247.08 N 10) 2450.60 ± 242.15 N and 11) 2611.42 ± 333.15 N. One-way ANOVA and Tamhane multiple comparisons revealed that the means of maximum compressive load for porcelain fracture of the group 1-5 were not significantly different (p>0.05). In the groups of 2.0 mm porcelain but varied metal thickness, the 0.1 mm of metal thickness group showed a minimum of the means of maximum compressive load and was significantly different (p<0.05) in comparison to the 0.3, 0.4, 0.7, 1.0 and 1.3 mm of metal thickness groups whereas the 0.3, 0.4, 0.7, 1.0 and 1.3 mm of metal thickness groups was not significantly different (p>0.05). The means of maximum compressive load for porcelain fracture of the 0.2 mm of metal thickness group were not significantly different (p>0.05) in comparison to the other groups.

Department: Prosthodontics

Student's Signature: \_\_\_\_\_

Field of Study: Prosthodontics

Advisor's Signature: \_\_\_\_\_

Academic Year: 2006



## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย ที่ท่านให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆมากมายอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังได้สละเวลาอันมีค่าของท่านในการตรวจ และแก้ไขการเขียนวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอน จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ไพพรรณ พิทยานนท์ ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ช่วยเหลือรวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมืออันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจุมพล พงษ์สามารถ ตลอดจนเจ้าหน้าที่และช่างทันตกรรมในห้างหุ้นส่วนจำกัด แอตตา เด็นทัล แลป ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ รวมทั้งให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในงานวิจัย และอำนวยความสะดวกทุกขั้นตอนในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาและพี่ๆทุกคนผู้ซึ่งให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบพระคุณ นายสรศักดิ์ อังวรวงษ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง อรุมา อังวรวงษ์ ผู้ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา และขอขอบพระคุณผู้มีพระคุณที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด ที่ช่วยเหลือในการทำงานและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จ



# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่ 1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
คำถามของการวิจัย.....	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
ข้อจำกัดของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
รูปแบบการวิจัย.....	4
บทที่ 2 . เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
พอร์ชเลน.....	5
โลหะผสม.....	9
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของกรอบฟัน โลหะเคลือบกระเบื้อง.....	14
แรงยึดระหว่างพอร์ชเลนกับโครงโลหะ	
การออกแบบโครงโลหะ	
การเข้ากันได้ของโลหะและพอร์ชเลน	
ความล้มเหลวของการบูรณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้อง.....	29
การศึกษาเกี่ยวกับการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีผลกับ	
ความต้านทานต่อการแตกหักของพอร์ชเลน.....	32

การศึกษาเกี่ยวกับการแตกหักของเซรามิกสั้วที่มีความหนา หรืออัตราส่วนของแกนและวีเนียร์พอร์ซเลนแตกต่างกัน.....	36
บทที่ 3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
ประชากรเป้าหมายและประชากรตัวอย่าง.....	37
เกณฑ์การคัดเข้า.....	37
เกณฑ์การคัดออก.....	37
สิ่งแทรกแซง.....	38
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	38
วิธีการทดลอง.....	40
การเตรียมชิ้นตัวอย่าง	
การทดสอบหาค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน	
การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	47
การวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
บทที่ 4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	48
ข้อมูลดิบและการวิเคราะห์ผลทางสถิติจากข้อมูลดิบ.....	48
ลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลอง.....	53
บทที่ 5. อภิบาย ข้อเสนอแนะ และสรุปผลการวิจัย.....	60
อภิบาย.....	60
อภิปรายระเบียบวิธีการวิจัย	
อภิปรายผลการวิจัย	
ข้อเสนอแนะ.....	69
สรุปผลการวิจัย.....	70
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	95

# สารบัญตาราง

ฉ

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกโลหะผสมตามคุณสมบัติทางกายภาพ โดย ANSI/ADA specification no. 5 ในปี 1989.....	10
ตารางที่ 2 แสดงการแบ่งชนิดของโลหะผสมทางทันตกรรมโดยสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน ในปี 1984 (The 1984 ADA classification for dental alloys).....	10
ตารางที่ 3 แสดงส่วนประกอบ คุณสมบัติ สี และการนำโลหะผสมไปใช้งานทางทันตกรรม.....	13
ตารางที่ 4 แสดงข้อแนะนำของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน.	17
ตารางที่ 5 แสดงข้อได้เปรียบ ข้อเสียเปรียบ ข้อบ่งชี้ของการออกแบบขอบด้านหน้าชนิดต่างๆ.....	27
ตารางที่ 6 แสดงกลุ่มตัวอย่างที่มีความหนาของโครงโลหะและพอร์ซเลนต่างกัน.....	40
ตารางที่ 7 แสดงข้อมูลคิบั ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงอัดสูงสุด ที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ.....	50

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของโลหะและพอร์ซเลนที่สามารถเกิดขึ้นได้.....	28
เกี่ยวกับการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน	
ภาพที่ 2 แสดงรอยร้าวของโลหะเคลือบกระเบื้องเนื่องจากมีความเค้นแบบดึงตกค้าง เมื่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอร์ซเลนมีค่าน้อยกว่า ของโลหะมากเกินไป.....	29
ภาพที่ 3 แสดงแผ่นเหล็กสำหรับทำแบบขึ้นรูป.....	41
ภาพที่ 4 แสดงการเตรียมแบบหล่อคูราเลย์.....	41
ภาพที่ 5 แสดงการยึดแบบหล่อคูราเลย์กับขี้ผึ้งแกนค้ำรูเท.....	41
ภาพที่ 6 แสดงชิ้นโลหะที่ขัดแต่งจนได้ความหนาที่ต้องการ.....	42
ภาพที่ 7 แสดงเครื่องวัดความหนาไมโครมิเตอร์.....	42
ภาพที่ 8 แสดงเครื่องเป่าทราย.....	42
ภาพที่ 9 แสดงเครื่องทำความสะอาดพื้นผิวด้วยไอน้ำ (stream cleaner).....	42
ภาพที่ 10 แสดงเตาเผาโครงโลหะเพื่อสร้างชั้นออกไซด์.....	43
ภาพที่ 11 แสดงชิ้นงานที่ทำการเตรียมพื้นผิวโลหะก่อนการขึ้นรูปวีเนียร์พอร์ซเลน.....	43
ภาพที่ 12 แสดงเตาเผาพอร์ซเลน.....	44
ภาพที่ 13 แสดงการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่เหนือเสียง.....	44
ภาพที่ 14 แสดงชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่ทำการเคลือบผิวแล้ว.....	44
ภาพที่ 15 แสดงกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ.....	45
ภาพที่ 16 แสดงเครื่องเป่าทราย.....	46
ภาพที่ 17 แสดงการยึดชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งวัสดุที่มีค้อนน้ำหนัก 5 กิโลกรัม.....	46
ภาพที่ 18 แสดงชิ้นงานที่ยึดอยู่บนแป้นทองเหลือง.....	46
ภาพที่ 19 แสดงการทดสอบแรงอัดในแนวตั้งด้วยเครื่องทดสอบสากล.....	47
ภาพที่ 20 แผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน ของกลุ่มที่ 1-5.....	51
ภาพที่ 21 แผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน ของกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11 .....	51
ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ.....	54
ภาพที่ 23 แสดงการโค้งงอของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องกลุ่มที่ 6 ซึ่งโลหะหนา 0.10 มม. ....	65

ภาพประกอบ

- ภาพที่ 24 แสดงรอยร้าวเล็กๆ ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อพอร์ซเลนได้รับความเค้นแบบดึง  
ส่งผลให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน ได้ง่ายขึ้น.....65
- ภาพที่ 25 แสดงสมการของความสัมพันธ์ของแรง ความหนาและระดับของการผิครูปของโลหะ..65
- ภาพที่ 26 แสดงการโค้งงอของชิ้นงาน โลหะเคลือบกระเบื้องกลุ่มที่ 7 ซึ่งโลหะหนา 0.20 มม. ....66

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การบูรณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้อง (metal-ceramic restorations, ceramometal restoration, porcelain fused to metal restoration or porcelain bonded to metal restoration) ทางทันตกรรมเริ่มต้นในศตวรรษที่ 19 และมีการใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากอาศัยข้อเด่นของพอร์ซเลนและโลหะ (1-6) อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปใช้งานก็ยังคงพบความล้มเหลวที่เกิดขึ้น โดย Strub, Stiffler และ Schärer (7) ทำการศึกษาติดตามผลทางคลินิกในผู้ป่วยที่ได้รับการบูรณะด้วยครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องเป็นระยะเวลา 7 ปี พบว่ามีการแตกหักของพอร์ซเลน 2.7% ขณะที่ Walton, Gardner และ Agar (8) พบการแตกหักของพอร์ซเลนที่มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 5.7 ปี ถึง 16 % ส่วน Cheung (9) ทำการสุ่มตรวจผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วยครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องเป็นเวลานาน 33.4 เดือน พบว่ามีการแตกหักของสิ่งประดิษฐ์คิดเป็น 6.25% จากการติดตามผลทางคลินิกหลายการศึกษา (8-10) สรุปได้ว่าการแตกหักของพอร์ซเลนเป็นความล้มเหลวเชิงกล (mechanical failure) ที่พบมากที่สุดในการบูรณะด้วยครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง โดย Coomaert, Adriaens และ de Boever (2) สำรวจฟันที่ได้รับการบูรณะด้วยโลหะทองเคลือบกระเบื้องจำนวน 2,181 ซี่ ที่มีการใช้งานนาน 7 ปี พบอัตราความล้มเหลวเชิงกลซึ่งเกิดจากการแตกหักของพอร์ซเลนถึง 2.38% โดยความล้มเหลวนี้เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ กัน เช่น จากการที่มีความหนาของโครงโลหะน้อยเกินไป 13.46% การออกแบบโครงโลหะที่ไม่ถูกต้อง 23.08% การออกแบบโครงโลหะที่ไม่เหมาะสมกับลักษณะการสบฟัน 13.46% และการทำงานนอกหน้าที่ (parafunction) เช่น การนอนกัดฟัน (bruxism) 42.31%

ความล้มเหลวของการบูรณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้อง ถือเป็นปัญหาที่เกิดจากหลายปัจจัย (multi-factorial problem) ซึ่งอาจเกิดร่วมกัน เช่น การออกแบบสิ่งบูรณะที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม (improper design of the restoration or faulty design of the metal substructure design) การมีพอร์ซเลนที่หนาเกินไปรวมกับการมีโลหะที่รองรับไม่เพียงพอ (inadequate metal support) ส่งผลให้มีการโค้งงอของโลหะขณะใช้งาน การกรอแต่งฟันหลักที่ไม่ดีพอ (poor abutment preparation) การมีระยะปลดการสบ (interocclusal space) น้อยเกินไปสำหรับโครงโลหะและพอร์ซเลน การไม่เข้ากันของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน (incompatible thermal coefficients) ระหว่างโครงโลหะและพอร์ซเลน ความแตกต่างอย่างมากของค่ามอดุลัส (modulus)

ระหว่างโลหะและพอร์ซเลน การมีรอยตำหนิขนาดเล็ก (microdefects) หรือมีรอยร้าวเล็กๆ (ที่รู้จักว่า Griffith's flaws) ในพอร์ซเลน การมีรอยขีดข่วนที่พื้นผิวพอร์ซเลน การผิดพลาดทางเทคนิค (technical error) หรือข้อบกพร่องทางห้องปฏิบัติการ (laboratory defect) การปนเปื้อน (contamination) การได้รับแรงที่มีลักษณะเป็นรอบเดียว (single load cycle) เช่น แรงกระแทก (impact load) การได้รับแรงพลวัตซ้ำหลายครั้ง (repetitive dynamic loading) หรือแรงล้า (fatigue load) เช่น แรงจากการบดเคี้ยว (mastication) การทำงานนอกหน้าที่ (parafunction) ได้แก่ การนอนกัดฟัน (bruxism) การสบก่อนตำแหน่งกำหนด (destructive premature contact) หรือการบาดเจ็บเหตุสบฟัน (occlusal trauma) สิ่งแวดล้อมในช่องปาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้รับความชื้น และการดื่มเครื่องดื่มที่มีความเป็นกรดสูง (low pH) (6, 11-19)

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่า การแตกหักของพอร์ซเลนเป็นความล้มเหลวที่พบได้บ่อยจากการบูรณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้อง โดยการออกแบบสิ่งบูรณะให้มีความหนาของโครงโลหะและพอร์ซเลนที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อความสำเร็จหรือความล้มเหลวของสิ่งบูรณะ การออกแบบที่มีโลหะรองรับหนาไม่เพียงพอและการมีพอร์ซเลนหนาเกินไปก็เป็นสาเหตุหนึ่งของความล้มเหลวที่เกิดขึ้น ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาใดที่ทำการหาค่าที่เหมาะสมของความหนาของโครงโลหะและพอร์ซเลน มีเพียงข้อเสนอแนะและความคิดเห็นเท่านั้น เช่น ความหนาที่บางที่สุดของโครงโลหะที่ทำได้ในกรณีที่เป็นโลหะผสมไร้สตุล (predominantly base metal alloy) คือ 0.1-0.2 มม. (20) 0.2 มม. (4, 20-26) และ 0.25 มม. (27) ในกรณีเป็นโลหะผสมทองหรือโลหะผสมมีสตุลจะมีความหนาน้อยที่สุด 0.3 มม. (4, 18, 20, 23, 28-30) 0.3-0.4 มม. (25, 26, 31, 32) 0.3-0.5 มม. (24, 30, 33-35) 0.4-0.5 มม. (20, 22) และ 0.5 มม. (21, 36, 37) ส่วนความหนาของพอร์ซเลนซึ่งมีข้อเสนอแนะว่าควรมีความหนาที่สม่ำเสมอ (18, 24, 29, 30) ซึ่งสามารถทำให้บางที่สุดได้ถึง 0.5 มม. (18) 0.7 มม. (24, 33) หรือ 0.75 มม. (18) แต่ความหนาที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดความสวยงามจะต่างกันออกไป เช่น 1.0 มม. (4, 17, 22-24, 30) 1.0-1.5 มม. (18, 28, 29, 36) 1.5 มม. (34, 35) และไม่ควรมีความหนาเกิน 2.0 มม. (4, 18, 23, 28, 31, 38, 39) ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีความผันแปรของความหนาของโครงโลหะและพอร์ซเลน สำหรับใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้ความหนาของโลหะและพอร์ซเลนให้เหมาะสมกับการปิดสิ่งกีดขวาง (occlusal clearance) ในการบูรณะด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้อง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทันตกรรมรากเทียมที่มีค่าของการปิดสิ่งกีดขวางมาก เนื่องจากความหนาของโครงโลหะและพอร์ซเลนเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งทันตแพทย์และช่างทันตกรรมสามารถที่จะควบคุมได้เพื่อลดความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจากการแตกหักของพอร์ซเลนในคลินิก



## คำถามของการวิจัย

1. พอร์ชเลนที่มีความหนามากในชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องมีโอกาทำให้พอร์ชเลนแตกหักได้มากขึ้นหรือไม่

2. โลหะที่มีความหนาสามารถต้านทานการแตกหักของพอร์ชเลนในชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องได้หรือไม่

## วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาถึงผลของความผันแปรของความหนาของพอร์ชเลนที่มีความหนาของโลหะคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ชเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง

2. เพื่อศึกษาถึงผลของความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ชเลนคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ชเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง

## สมมติฐานของงานวิจัย

1)  $H_{0a}$  : ความผันแปรของความหนาของพอร์ชเลนไม่มีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง

$H_{1a}$  : ความผันแปรของความหนาของพอร์ชเลนมีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง โดยทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ )

2)  $H_{0b}$  : ความผันแปรของความหนาของโลหะไม่มีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง

$H_{1b}$  : ความผันแปรของความหนาของโลหะมีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง โดยทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ )

## ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (laboratory experimental research) ที่ทำการทดสอบแรงอัดในแนวตั้ง (vertical compressive load) ของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7 ม.ม. x 9 ม.ม. ที่มีความหนาของโลหะและพอร์ชเลนแตกต่างกัน

เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงาน และอ้างอิงผลการทดลองที่ได้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ทางคลินิกต่อไป

### ข้อตกลงเบื้องต้น

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบแรงอัดในแนวตั้งของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่ไม่เตรียมชิ้นงานขึ้นมาในรูปแบบของกรอบฟัน แต่เตรียมชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเท่ากับด้านบดเคี้ยวของฟันกรามน้อยบน คือ 7 มม. x 9 มม. ที่มีความหนาแตกต่างกันไป เนื่องจากต้องการวิเคราะห์เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลนเท่านั้น จึงตัดปัจจัยอื่นๆที่มีผลเกี่ยวกับค่าการแตกหักของพอร์ซเลนออกไป เช่น ชนิดของการออกแบบกรอบฟัน ความเค้นแบบดึงออกจากศูนย์กลาง (radial tensile stress) ซึ่งเกิดขึ้นได้ในโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีรูปร่างทรงกลมหรือมีความโค้ง แต่ไม่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่มีรูปร่างแบน นอกจากนี้การที่เตรียมชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมทำให้สามารถควบคุมความหนาที่ต้องการได้อย่างถูกต้องเที่ยงตรง

### ข้อจำกัดของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบแรงอัดในแนวตั้งของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่ไม่ได้ถูกเตรียมขึ้นมาในรูปแบบของกรอบฟัน รวมไปถึงสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองนี้ก็แตกต่างไปจากในช่องปาก ดังนั้นค่าที่ได้ไม่สามารถนำไปอ้างอิงค่าที่ได้จริงจากการบรูณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้องในทางคลินิกได้ แต่สามารถนำผลที่ได้ไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ทางคลินิกต่อไป เพื่อลดอัตราการแตกหักของพอร์ซเลนในบรูณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องในทางคลินิกได้

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้ความหนาของโลหะและพอร์ซเลนให้เหมาะสมกับการปิดสิ่งกีดขวาง (occlusal clearance) ในการบรูณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทันตกรรมรากเทียมที่มีค่าของการปิดสิ่งกีดขวาง (occlusal clearance) มากได้อย่างเหมาะสม

### รูปแบบการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การบูรณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้องมีการใช้อย่างมากมานานกว่า 40 ปี โดยประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นโครงโลหะ (metal coping, casting, substructure or framework) และพอร์ซเลนซึ่งปกคลุมส่วนที่เป็นโครงโลหะ

#### เซรามิก

เซรามิก คือ สารประกอบอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่ใช่โลหะ (non-metallic element) โดยเฉพาะออกซิเจน และส่วนที่เป็นโลหะหรือกึ่งโลหะ (metallic or semimetallic element) หนึ่งชนิดหรือมากกว่า (40) ส่วนพอร์ซเลนเป็นชนิดหนึ่งของเซรามิก โดยเซรามิกที่ใช้สำหรับการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องมักเรียกว่าพอร์ซเลนทางทันตกรรม (dental porcelain)

#### พอร์ซเลน

พอร์ซเลนนำมาใช้ในทางทันตกรรมครั้งแรกในปี 1789 โดย de Chemant นำมาทำซี่ฟันปลอมพอร์ซเลน (porcelain tooth) จนกระทั่งปี 1903 Dr. Charles Land ได้มีการพัฒนามาทำครอบฟันพอร์ซเลนแจ็กเก็ต (porcelain jacket crowns) ขึ้น โดยประกอบด้วย เฟลด์สปาร์ติกพอร์ซเลนที่มีจุดหลอมตัวสูง (high-fusing feldspathic porcelain) หรืออลูมินัสพอร์ซเลน (aluminous porcelain) ปกคลุมอยู่บนแผ่นทองคำขาว (platinum foil matrix) ซึ่งมีความสวยงามสูง แต่มีความแข็งแรงต่ำ จึงใช้ได้เฉพาะในฟันหน้าเท่านั้น ต่อมาในปี 1962 Dr. Abraham M. Weinstein et al. ได้นำครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องมาใช้ในผู้ป่วยเป็นครั้งแรก แต่ก็พบความล้มเหลวที่เกิดจากการแตกหักของพอร์ซเลนตามมา เนื่องจากการไม่เข้ากันของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนระหว่างโครงโลหะและพอร์ซเลนที่คลุมทับ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเฟลด์สปาร์ติกพอร์ซเลนที่มีลูไซต์เป็นส่วนประกอบ (leucite-containing feldspathic porcelains) เพื่อแก้ไขปัญหา นี้ จึงทำการควบคุมปริมาณของลูไซต์ที่มีการขยายตัวสูงกับแก้วเฟลด์สปาร์ (high-expansion leucite with feldspar glass) ในขั้นตอนการผลิต การปรับปรุงคุณสมบัติของเฟลด์สปาร์ติกพอร์ซเลน ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับโลหะ ทำให้สามารถนำพอร์ซเลนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพจนถึงปัจจุบัน (40, 41)

พอร์ซเลนที่ใช้ในการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง ประกอบไปด้วย เฟลด์สปาร์ (feldspar) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก มีอยู่ถึงร้อยละ 65-85 นอกนั้นเป็นซิลิกาหรือควอartz (silica or quartz) และออกไซด์ชนิดต่างๆ (oxide) หรือสารเพิ่มสี (metallic pigment)

เฟลด์สปาร์ ประกอบด้วย โปแทสเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ และอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) โดยที่โปแทสเซียมและโซเดียม ทำหน้าที่ในการลดอุณหภูมิที่หลอมเหลวของแก้ว (softening temperature of the glass) และเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ขณะที่อลูมินาทำหน้าที่เป็นออกไซด์ที่อยู่ระหว่างกลาง (intermediate oxide) เพื่อเพิ่มความหนืดและความแข็งของแก้ว ส่งผลให้พอร์ซเลนมีความต้านทานต่อการไหลแผ่ของพอร์ซเลนเนื่องจากความร้อน (หรือ pyroplastic flow) ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ได้รูปร่างของสิ่งบูรณะที่ต้องการ (42) หรืออาจกล่าวได้ว่าเฟลด์สปาร์คือส่วนที่เป็นโปแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (potash feldspar : potassium aluminosilicate :  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ) และ/หรือโซดาเฟลด์สปาร์ (soda feldspar : sodium aluminosilicate :  $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ) (40, 43) โดยที่โซดาเฟลด์สปาร์ทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว (fusing temperature) มีค่าต่ำลง ขณะที่โปแทสเซียมเฟลด์สปาร์ทำหน้าที่เพิ่มความหนืดของแก้วที่หลอมเหลว (viscosity of the molten glass) เมื่อผ่านกระบวนการเผา

เฟลด์สปาร์เมื่อมีการหลอมรวมกันจะประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือลักษณะคล้ายแก้ว (glassy or vitreous phase) และลักษณะที่เป็นผลึก (crystalline or mineral phase) ซึ่งก็คือลูไซต์ โครงสร้างส่วนที่เป็นแก้วจะเป็นโครงข่ายซิลิกา (random Si-O network) ซึ่งซิลิกอนอะตอมจะเชื่อมกับออกซิเจน 4 ตัว เกิดเป็นรูปร่างทรงสี่หน้า (Si-O tetrahedral configuration) ที่อาจจะเชื่อมเป็นสายโซ่ด้วยพันธะโคเวเลนต์และพันธะไอออนิก ทำให้โครงสร้างที่ได้มีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตาม โครงข่ายซิลิกาจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูง ดังนั้นจึงมีการเติมโปแทสเซียมและโซเดียมเข้าไปในส่วนประกอบของแก้วเพื่อช่วยให้โครงข่ายซิลิกาแตกออก ในกรณีที่มีการปรับส่วนประกอบของโครงข่ายซิลิกาไม่เหมาะสม จะส่งผลให้มีการแตกออกของโครงข่ายซิลิกาอย่างมากและมีการสร้างโครงข่ายซิลิกาขึ้นมาใหม่ทำให้เกิดผลึกของแก้วขึ้น (crystallization of the glass) ที่เรียกว่า การทำสภาพขุ่น (devitrification) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (lattice structure) จากแก้วไปเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึก ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเพียงบางส่วนของพอร์ซเลนที่มีการเผาหลายครั้ง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ จะสัมพันธ์อย่างมากกับการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน เพิ่มความขุ่นทึบ (opacity) ของพอร์ซเลน และลดค่าความต้านทานต่อการแตกหักของพอร์ซเลน โครงสร้างส่วนที่เป็นแก้วจะมีคุณสมบัติของแก้วอยู่ คือ เปราะ รูปแบบการแตกหักเป็นแบบไม่มีทิศทาง (nondirectional fracture pattern) โปร่งแสง (translucency) และมีแรงตึงผิว (surface tension) สูงในสภาพของเหลว (fluid state) ส่วนลูไซต์หรือโปแทสเซียมอลูมินัมซิลิเกต

(potassium-aluminium-silicate :  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ ) ที่มีการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูง ( $>20 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ) ทำหน้าที่ส่งเสริมให้เกิดความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลน โดยที่พอร์ซเลนที่มีลูไซต์ในปริมาณที่มาก (high-leucite porcelain) จะมีความแข็งแรงเป็นสองเท่าของพอร์ซเลนที่มีลูไซต์ในปริมาณที่ต่ำ (24, 40-42, 44, 45)

ส่วนซิลิกาหรือควอร์ทซ (SiO<sub>2</sub>) เมื่อผ่านกระบวนการเผาจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง (strengthening agent) ในรูปแบบของผลึกที่ละเอียด (fine crystalline dispersion) กระจายอยู่ในส่วนที่เป็นแก้ว

ส่วนสารเพิ่มสี เติมเข้าไปเพื่อทำให้เกิดสีเหมือนกับฟันธรรมชาติที่อยู่ข้างเคียงได้แก่ ไทเทเนียมออกไซด์ซึ่งให้สีน้ำตาลเหลือง แมงกานีสออกไซด์ให้สีลาเวนเดอร์ (lavender) ออกไซด์ของเหล็กให้สีน้ำตาล โคบอลออกไซด์ให้สีฟ้า น้ำเงิน ออกไซด์ของทองแดงหรือโครเมียมออกไซด์ให้สีเขียว และนิกเกิลออกไซด์ให้สีน้ำตาล ส่วนออกไซด์ของดีบุก ไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมใช้เป็น โอแพคซิไฟเออร์ (opacifier) (41)

**พอร์ซเลนที่ใช้ในการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องจะประกอบด้วย 3 ชั้น คือ**

1. โอเพคพอร์ซเลน (opaque porcelain) มี 3 ชนิด คือ ชนิดปลายฟัน เนื้อฟัน และคอฟัน (incisal, body และ cervical opaque porcelain) ประกอบด้วย โอแพคซิไฟอิงออกไซด์ (opacifying oxide) และสารเพิ่มสี โดยชั้นนี้จะมีความหนาของออกไซด์มากกว่าส่วนแก้ว ซึ่งออกไซด์ที่ใช้คือ ออกไซด์ของไทเทเนียม เซอร์โคเนียม ดีบุก หรือ เซอร์เรียม (cerium) ที่มีค่าดัชนีหักเหของแสง (optical index of refraction) ที่แตกต่างจากส่วนประกอบอื่น ร่วมกับการเลือกใช้ขนาดของอนุภาคออกไซด์ให้อยู่ในช่วงที่จำเพาะ (specific range of oxide particle sizes) จะทำให้เกิดการสะท้อน (reflect) และการกระเจิงของแสง (scatter) มากกว่าการส่องผ่าน (transmit) ของแสงผ่านพอร์ซเลน โดยออกไซด์ของไทเทเนียมและเซอร์โคเนียมที่ต่อกับอลูมินาจะทำหน้าที่เป็น opacifying agent ส่งผลให้สามารถปิดสีของโลหะที่อยู่ข้างใต้ได้ ขณะที่สารเพิ่มสีเป็นตัวที่ให้สีกับพอร์ซเลน โอเพคพอร์ซเลนทำหน้าที่ในการปิดสีของโครงโลหะที่อยู่ข้างใต้และเป็นสีพื้นฐานที่เป็นส่วนสำคัญในการเกิดสีภายในของครอบฟัน รวมถึงการเลือกสีและความหนาของโอเพคพอร์ซเลนมีความสำคัญต่อระดับของการส่องผ่านของแสงของสีโลหะ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการยึดระหว่างโลหะและพอร์ซเลนอีกด้วย (10, 20, 24, 26, 42, 46-48)

2. พอร์ซเลนเนื้อฟัน (dentin or body porcelain) ประกอบไปด้วย ออกไซด์ และสารเพิ่มสีต่างๆหลายชนิด โดยจะถูกเผาอยู่บนชั้น โอเพคพอร์ซเลนและเชื่อมต่อกับพอร์ซเลนเคลือบฟัน ทำหน้าที่ส่วนใหญ่ในการให้สีและให้ความโปร่งแสง

**3. พอร์ซเลนเคลือบฟัน (enamel or incisal porcelain)** มีความโปร่งแสงสูง แสงส่องผ่านได้มาก ทำให้เห็นสีพอร์ซเลนเนื้อฟัน

พอร์ซเลนที่ใช้ในทางทันตกรรมได้รับความนิยมอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีความสวยงาม มีสีและการสะท้อนแสงใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติ มีความต้านทานต่อรอยขีดข่วนสูง (abrasion resistance) มีเสถียรภาพทางเคมีสูง มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) กับเนื้อเยื่อในช่องปากเป็นอย่างดี มีการนำความร้อนและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนใกล้เคียงกับเนื้อฟันและเคลือบฟัน มีความทนแรงอัด (compressive strength) ที่สูงมากถึง 350-550 MPa แต่มีความต้านแรงดึง (tensile strength) ที่ต่ำมาก คือ 20-60 MPa และมีความเปราะคล้ายแก้ว (44, 49) อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของพอร์ซเลนยังขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ สัดส่วนที่ถูกต้องของแต่ละส่วนประกอบ และการควบคุมขั้นตอนของการเผา เช่น ในขั้นตอนการอัดแน่น (condensation) ถ้าทำให้ผงพอร์ซเลนมีการอัดแน่น ก็จะเกิดการหดตัวน้อย และพอร์ซเลนจะมีความแข็งแรง ในขั้นตอนการเย็นตัวลง (cooling) ไม่ควรทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพื้นผิวด้านนอกจะเย็นตัวเร็วกว่าบริเวณที่อยู่ข้างใน ส่งผลให้พื้นผิวด้านนอกเกิดรอยแตกร้าวหรือรอยร้าว (crazing หรือ cracking) เรียกลักษณะการเกิดนี้ว่า thermal shock (26) นอกจากนี้ก็ไม่ควรทำให้มีการเย็นตัวลงอย่างช้ามาก ๆ ซึ่งจะชักนำให้เกิดการสร้างรูจุลที่เพิ่มมากขึ้นและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้เกิดรอยร้าวที่พื้นผิวได้ (41) นอกจากนี้การมีอัตราการเย็นตัวที่ไม่ถูกต้อง ส่งผลให้มีความเค้นตกค้าง (residual stress) และมีผลต่อการแตกหักของพอร์ซเลนเมื่อใช้งาน (48)

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นการยากที่จะนำพอร์ซเลนมาใช้ในทางทันตกรรมให้มีประสิทธิภาพโดยไม่มีการปรับปรุงคุณสมบัติก่อน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการเสริมความแข็งแรงของพอร์ซเลนซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน (40) การนำเฟลด์สปาร์ติกพอร์ซเลนมาเคลือบบนโลหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอร์ซเลนแล้ว (10, 17, 26, 28, 36, 37, 50) ยังลดความแข็งแต่เปราะ (hardness & fragility) ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยธรรมชาติของพอร์ซเลนอีกด้วย เนื่องจากแผ่นโลหะหือยจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เกิดความเค้นแบบดึง ซึ่งจะทำให้รอยแตกเล็กๆ ขยายใหญ่ขึ้นและแตกต่อเข้าไปข้างในได้ ทำให้ชั้นพอร์ซเลนแตกหักได้ยากขึ้น นอกจากนี้การเลือกใช้โลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนมากกว่าพอร์ซเลนเล็กน้อย เมื่อนำโลหะไปผ่านกระบวนการเคลือบพอร์ซเลนแล้วปล่อยให้เย็นลง ชั้นโลหะจะมีการหดตัวมากกว่าพอร์ซเลน จึงก่อให้เกิดแรงเค้นอัดขึ้นที่ด้านของพอร์ซเลนตรงที่เป็นรอยต่อ เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำจะทำให้เกิดแรงเค้นดึงขึ้นที่พื้นผิวของพอร์ซเลนบริเวณรอยต่อ แรงนี้จะถูกหักล้างไปได้โดยแรงเค้นที่อัดค้างอยู่ ซึ่งเป็นการลดการขยายใหญ่ขึ้นของรอยแตกเล็กๆ ได้อีกทางหนึ่ง ส่งผลให้

พอร์ซเลนมีความแข็งแรงมากขึ้น และนั่นคือจุดเริ่มต้นของการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องที่ใช้กันอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน (26)

### โลหะผสม (alloy)

โลหะผสมเป็นวัสดุผสมที่เกิดจากการรวมกันของโลหะ 2 หรือมากกว่า (51) หรือเกิดจากการรวมกันของโลหะอย่างน้อยสองชนิดกับอโลหะ (52, 53) ถูกนำมาใช้ในทางทันตกรรมเป็นเวลานาน เนื่องจากโลหะบริสุทธิ์มีคุณสมบัติไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในช่องปาก ดังนั้นจึงมีการใช้โลหะผสม ที่มีโลหะหลัก เช่น ทอง พัลเลเดียม เงิน ทองคำขาว ทองแดง นิกเกิล โครเมียม โคบอลต์ ผสมในสัดส่วนที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางเคมี และทางชีวภาพที่เหมาะสม (53)

ก่อนปี ค.ศ. 1975 มีการแบ่งชนิดของโลหะผสมที่ใช้ในงานทันตกรรมประดิษฐ์ ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ โลหะผสมสำหรับหล่อ (casting alloys) โลหะผสมที่ใช้ยึดติดกับพอร์ซเลน (porcelain-bonding alloys) และโลหะผสมสำหรับโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้ (alloys for removable partial denture framework) (52)

ปัจจุบันมีการจำแนกชนิดของโลหะผสมสำหรับหล่อต่างไปจากเดิมและมีหลายระบบ แต่ระบบที่มีการใช้มากคือ จำแนกชนิดของโลหะผสมโดยสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน (The American Dental Association : ADA) แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ 1) จำแนกตามคุณสมบัติทางกายภาพที่เกี่ยวกับความแข็งแรงครากและการยืดตัว (physical properties of yield strength and elongation) และ 2) จำแนกตามปริมาณของส่วนประกอบ (wt% composition)

1) การจำแนกโลหะผสมตามคุณสมบัติทางกายภาพ (54) แบ่งโลหะผสมออกเป็น 4 กลุ่มตามตารางที่ 1

2) การจำแนกโลหะผสมตามปริมาณของส่วนประกอบ ในปี 1984 สมาคมทันตแพทย์อเมริกา จำแนกโลหะผสมตามปริมาณของทองและปริมาณของโลหะมีสกุลทั้งหมดที่ผสมอยู่ (total noble metal content) แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ โลหะผสมมีสกุลสูง (high-noble alloys) โลหะผสมมีสกุล (noble alloys) และโลหะผสมไร้สกุล (predominantly base-metal alloys) ตามตารางที่ 2 (55)

ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกโลหะผสมตามคุณสมบัติทางกายภาพ โดย ANSI/ADA specification no. 5 ในปี 1989

ADA type	Hardness	Clinical use	Yield strength (MPa, in tension)	Elongation (%)
I	Soft	Low stress, no occlusion, inlay	<140	18
II	Medium	Moderate stress, light occlusion, onlays and inlays	140-200	18
III	Hard	High stress, full occlusal load, crowns, short-span fixed partial dentures	201-340	12
IV	Extra-hard	Very high stresses, thin veneer crowns, long span fixed partial dentures, removable partial dentures	>340	10

(ที่มา Revised ANSI/ADA specification no. 5 for dental casting alloys. Council on Dental Materials, Instruments, and Equipment. J Am Dent Assoc. 1989 Mar;118(3):379.

อ้างอิงใน Wataha JC. Alloys for prosthodontic restorations. J Prosthet Dent. 2002 Apr;87(4):351-63.)

ตารางที่ 2 แสดงการแบ่งชนิดของโลหะผสมทางทันตกรรมโดยสมาคมทันตแพทย์อเมริกัน ในปี 1984 (The 1984 ADA classification for dental alloys)

Alloy Classification	Total Noble Metal Content
High Noble	Must contain $\geq 40$ wt% Au and $\geq 60$ wt% of noble metal elements (Au, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Os)
Noble	Must contain $\geq 25$ wt% of noble metal elements
Predominantly Base Metal	Contain $< 25$ wt% of noble metal elements

(ที่มา Anusavice KJ, Cascone P. Dental casting and soldering alloys. In: Anusavice KJ, editor. Phillips' science of dental materials. 11<sup>th</sup> ed. St. Louis: Saunders; 2003. p. 570-4.)



การแบ่งแบบนี้จะให้ความสำคัญในเรื่องการกัดกร่อน (corrosion) โดยโลหะผสมที่มีโลหะมีสกุล (noble metal) ในปริมาณที่มากกว่าจะเกิดการกัดกร่อนได้น้อยกว่า (52) แต่ไม่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพ อุณหภูมิที่เข้ากันได้กับพอร์ซเลน รวมถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนสีของพอร์ซเลนได้ (56) ส่วนรายละเอียดเกี่ยวกับส่วนประกอบคุณสมบัติของโลหะผสมในแต่ละกลุ่ม แสดงในตารางที่ 3 (52, 53, 57)

### โลหะผสมไร้สกุล (predominantly base-metal alloys)

โลหะผสมพวกนี้มีส่วนประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพหลายอย่างที่ใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันในคุณสมบัติด้านการกัดกร่อน อาจผลิตออกมาทั้งแบบที่มีคาร์บอนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักและไม่มีคาร์บอน ในกรณีที่ใช้ในการบูรณะด้วยการหล่อ (cast restoration) โดยทั่วไปจะไม่มีคาร์บอน แต่ในกรณีที่ใช้ในโครงโลหะของฟันปลอมบางส่วนจะมีการเติมคาร์บอนลงไป เพื่อเพิ่มยึดยึดปฏิบัติ และความแข็ง (58)

โลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นพื้นฐาน (nickel-based alloy) อาจมีโครเมียมในส่วนประกอบประมาณร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก ทั้งในโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-เบริลเลียม และโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม ที่ไม่มีเบริลเลียม โดยเบริลเลียมเริ่มต้นถูกนำมาใช้เพื่อลดช่วงการหลอมตัวของโลหะผสม ปรับปรุงความสามารถในการหล่อ (castability) และความสามารถในการขัดผิว (polishability) ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความแข็ง (hardener) และช่วยควบคุมการสร้างออกไซด์ไม่ให้นานมากเกินไป ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มแรงยึดระหว่างพอร์ซเลนและโลหะ อย่างไรก็ตามการใช้โลหะผสมที่มีเบริลเลียมเป็นส่วนประกอบจะลดค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายต่อสุขภาพของช่างทันตกรรมและทันตแพทย์ (39, 59) ส่วนโมลิบดีนัม (molybdenum: Mo) ที่เติมเข้ามาในส่วนประกอบ ทำหน้าที่ในการปรับปรุงค่าความต้านทานต่อการสึกกร่อน มีผลต่อการสร้างออกไซด์ และช่วยในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนของโลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นพื้นฐาน (39) นอกจากนี้โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-เบริลเลียม จะมีการกัดกร่อนมากกว่าในโลหะนิกเกิล-โครเมียม โดยเฉพาะในสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรด (60) ส่วนโลหะผสมนิกเกิล-ไอ-โครเมียม ซึ่งมีปริมาณของโครเมียมมากกว่าร้อยละ 20 จะมีความต้านทานการกัดกร่อนมากที่สุดในกลุ่มและถูกใช้มากที่สุดในกลุ่มโลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นพื้นฐาน โลหะผสมโคบอล-โครเมียม มีช่วงการหลอมเหลวมากที่สุดของโลหะสำหรับหล่อ ยกเว้นโลหะผสมที่มีไททาเนียมเป็นพื้นฐาน (titanium-based alloys) ยากในการจัดการทางห้องปฏิบัติการไม่ว่าจะเป็นการหล่อ การกรอและการขัดแต่ง ผิวของออกไซด์ที่เกิดขึ้นของโลหะผสมโคบอล-โครเมียมยาก

เป็นพิเศษที่จะปิด นอกจากนี้การเข้ากันได้ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อโดยความร้อนระหว่างโลหะผสมโคบอล-โครเมียมกับพอร์ซเลนอาจมีปัญหาอยู่ (53)

ในปัจจุบันมีการใช้โลหะผสมไร้สกลในการบูรณะด้วยฟันปลอมติดแน่นอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เป็นข้อได้เปรียบอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งสูง มีความหนาแน่นต่ำ มีค่ามอดุลัสแห่งความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) มาก มีความต้านทานแรงดึงสูง มีค่าความต้านทานต่อการแอ่นตัว (sag resistance) สูง มีความต้านทานต่อการผิดรูปสูง (resistance to deformation) สามารถทำให้โครงโลหะบางกว่ากลุ่มโลหะผสมมีสกล ดังนั้นจึงเพิ่มความแข็งแรงให้กับการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง นอกจากนี้แล้วยังมีราคาอ่อนข้างคงที่และถูกกว่าโลหะผสมมีสกลซึ่งปัจจุบันมีราคาสูงเพิ่มมากขึ้น (10, 36, 39, 59, 61)

ตารางที่ 3 แสดงส่วนประกอบ คุณสมบัติ และการนำโลหะผสมไปใช้งานทางทันตกรรม

Alloy type	Subclass	Approximate composition (major element, wt%)	Elastic modulus (GPa)	Vicker's hardness (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield strength (tension, 0.2%, MPa)	CTE (x10 <sup>-6</sup> /°C)	Solidus- liquidus (°C)	Phase structure	color	Uses
High-noble-	Au-Pt (Zn) <sup>*</sup>	Au 85; Pt 12; Zn 1	65-96	165-210	360-580	14.5	1060-1140	Multiple	Yellow/White	Full-cast, Metal-ceramic restoration
	Au-Pd (Ag) <sup>*</sup>	Au 52; Pd 38; In 8.5	105	280	385	14.3	1160-1260	Single	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration
	Au-Cu-Ag	Au 72; Cu 10; Ag 14; Pd 3	100	210	450	NA	905-960	Single	Yellow	Full cast restoration
Noble-	Au-Cu-Ag-(Pd) <sup>*</sup>	Au 45; Cu 15; Ag 25; Pd 5	100	250	690	NA	880-930	Single	Yellow/White	Full-cast, Metal-ceramic restoration
	Pd-Cu-Ga	Pd 79; Cu 7; Ga 6	127	280	580	14.2	1145-1270	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration
	Pd-Ag	Pd 61; Ag 24; Sn 8	125	275	620	14.6	1185-1230	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration
	Ag-Pd	Ag 66; Pd 23; Au 2	93	230	480	NA	990-1045	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration
Predominantly Based-	Ni-Cr-Be	Ni 77; Cr 13; Be 2; C 0.1	192	350	825	15.0	1160-1270	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration, partial denture
	Ni-Cr	Ni 65; Cr 16 (no C)	205	180	330	14.0	1330-1390	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration, partial denture
	Ni-high-Cr	Ni 69; Cr 23(no C)	159	350	310	14.4	1250-1310	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration, partial denture
	Co-Cr	Co 56; Cr 25 (no C)	159	390	310	15.2	1215-1300	Multiple	White	Full-cast, Metal-ceramic restoration, partial denture

(ดัดแปลงจาก Wataha JC, Messer RL. Casting alloys. Dent Clin North Am. 2004 Apr;48(2):vii-viii, 499-512.; Wataha JC. Alloys for prosthodontic restorations. J Prosthet Dent. 2002 Apr;87(4):351-63. และ Craig RG, Powers JM, Wataha JC. Dental casting alloys and solders. Dental materials: properties and manipulation. eighth ed. St. Louis: Mosby; 2004. p.234-254.)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (24) คือ

- 1.แรงยึดระหว่างพอร์ซเลนกับโครงโลหะ (metal-porcelain bond)
- 2.การออกแบบโครงโลหะ (design of the metal coping)
- 3.การเข้ากันได้ของโลหะและพอร์ซเลน (compatibility of the metal and the porcelain)

### 1. แรงยึดระหว่างพอร์ซเลนกับโครงโลหะ

การเกิดแรงยึดที่แข็งแรงระหว่างชั้นโอเพกพอร์ซเลนกับโลหะ มีความสำคัญต่ออายุการใช้งานของการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง กลไกที่ใช้ในการอธิบายการยึดระหว่างพอร์ซเลนกับโครงโลหะ (bond mechanism) คือ **1)การยึดทางกลศาสตร์ (mechanical entrapment)** เกิดจากการที่พอร์ซเลนมีการไหลเข้าไปในช่องว่างเล็กๆ (microscopic space) บนพื้นผิวของโลหะ ทำให้เกิดการยึด (interlocking) ของพอร์ซเลนกับพื้นผิวที่ขรุขระ (microabrasions) บนผิวของโครงโลหะที่มีการเตรียมพื้นผิวโลหะ (surface treatment of the alloy) ด้วยวิธีการต่างๆ **2)แรงอัด (compressive force)** เกิดจากการที่โครงโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนมากกว่าพอร์ซเลนประมาณ  $0.5-1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ส่งผลให้พอร์ซเลนเกิดการอัดขึ้น (state of compression) ถ้าการไม่เข้ากัน (mismatch) ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนมีค่ามากๆ จะมีความเค้นภายใน (internal stress) เกิดขึ้นระหว่างที่มีการเย็นตัวลง เป็นสาเหตุให้พอร์ซเลนเกิดการแตกและแยกออกจากผิวโลหะ **3)แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force)** เกิดจากแรงดึงดูดของโมเลกุลที่มีประจุ (charge molecule) ทำให้เกิดแรงยึดขึ้น โดยอาศัยการไหลแผ่ (wetting) ของพอร์ซเลนที่อ่อนตัวบนโครงโลหะ ถ้ามีการไหลแผ่ที่ดี จะมีค่าแรงแวนเดอร์วาลส์มาก แม้ว่าแรงนี้จะมีค่าน้อยแต่ก็มีความสำคัญเนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของแรงยึดทางกลศาสตร์และทางเคมี **4)แรงยึดทางเคมี (chemical bond)** เกิดจากพอร์ซเลนไหลและหลอมรวมกันกับออกไซด์ที่อยู่บนผิวโลหะ (10, 24, 36, 62)

**ปัจจัยที่มีผลต่อแรงยึด (bond strength )** คือ 1)ระดับของความขรุขระ (degree of roughness) ซึ่งนอกจากส่งเสริมการแรงยึดทางกลศาสตร์ระหว่างโลหะและพอร์ซเลนแล้ว ยังช่วยในการกำจัดพื้นผิวที่ปนเปื้อนและทำความสะอาดขึ้นหล่อด้วย 2)การทำให้เกิดชั้นของออกไซด์ (oxide formation) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างพอร์ซเลนและโลหะ 3)ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อน โดยทั่วไปโลหะจะมีค่า  $13.5-14.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ส่วนพอร์ซเลนมีค่า  $13.0-14.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

และ4)การเตรียมพื้นผิวของโลหะก่อนที่จะมีการเผาพอร์ซเลน และบรรยากาศของเตาเผาพอร์ซเลน (atmosphere of porcelain furnace) ระหว่างที่มีการเผา (45, 61)

**ความล้มเหลวของการยึดติดของโลหะและพอร์ซเลน (bond failure)** แบ่งออก 6 ชนิดตามตำแหน่งที่เกิดความล้มเหลว ตามการจำแนกของ O' Brien ในปี 1977 และสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ การแตกหักในชั้นของพอร์ซเลนอย่างเดียวไม่ถึงชั้นของโลหะ (cohesive bond failure) การแตกหักจนถึงชั้นของโลหะ (adhesive bond failure) และการแตกหักในชั้นพอร์ซเลนและชั้นโลหะ (combination of cohesive and adhesive bond failure) โดยความล้มเหลวที่เกิดจากการยึดติดของโลหะและเซรามิกเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น มีชั้นของออกไซด์ไม่เพียงพอหรือมีหนาเกินไป อย่างไรก็ตามในกรณีที่เกิดการยึดอย่างแท้จริงขึ้น ความล้มเหลวหรือการแตกหักที่เกิดขึ้นจะเกิดในพอร์ซเลนมากกว่าเกิดในรอยต่อระหว่างโลหะและพอร์ซเลน (63) นักวิจัยส่วนใหญ่เชื่อว่ามียูริอานขนาดเล็กเกิดขึ้นอย่างมากบริเวณที่มีความเค้นสูง หรือในบริเวณที่มีการยึดที่ไม่เพียงพอระหว่างโลหะและพอร์ซเลน เมื่อรอยร้าวเพิ่มมากขึ้นพอที่จะเกิด catastrophic failure และเกิดการหลุดของพอร์ซเลนออกจากโลหะตามมา (43)

## 2. การออกแบบโครงโลหะ (metal substructure design)

ความแข็งแรงและการต้านทานการแตกหักของการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง ส่วนใหญ่แล้วขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงโลหะ ซึ่งโลหะจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะให้การรองรับพอร์ซเลนและต้านทานการผิกรูป (17, 18, 26, 28, 29, 33, 36, 37, 49, 64) เนื่องจากพอร์ซเลนมีคุณสมบัติในการต้านทานความเค้นอัดได้ดี แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักเมื่อได้รับความเค้นแบบดึง ดังนั้นโครงโลหะควรจะออกแบบให้พอร์ซเลนอยู่ภายใต้ความเค้นอัดหรือทำให้เกิดความเค้นแรงดึงในพอร์ซเลนน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการแตกหักของพอร์ซเลน (29)

**ลักษณะที่มีความสำคัญในการออกแบบโครงโลหะในการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง (24) คือ**

- 1) ความหนาของโลหะและพอร์ซเลน
- 2) ตำแหน่งของสัมผัสสบฟัน (occlusal contact) สัมผัสประชิด (proximal contact) และการขยายพื้นที่ของวีเนียร์ (extension of veneered area)
- 3) การออกแบบขอบด้านหน้า (design of facial margin)

### 2.1 ความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

โครงโลหะจะต้องมีความหนาที่เพียงพอที่จะต้านทานการโค้งงอ (flex) หรือการผิกรูปเมื่อทำหน้าที่ Yamamoto (26) กล่าวว่า มีความสัมพันธ์ที่ได้สัดส่วน (proportional relation)

ระหว่างความหนาและระดับของการผิดรูป (degree of deformation) โดยโครงโลหะที่หนาเพิ่มขึ้น 2 เท่า จะต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นถึง 8 เท่าในการทำให้เกิดการผิดรูปในขนาดที่เท่ากัน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบโครงโลหะให้มีความหนาเท่าที่จะทำได้ นอกจากนี้ยังกล่าวว่ามี 2 สิ่งที่สำคัญในการออกแบบคือ พอร์ซเลนต้องมีความหนาที่เพียงพอ เพื่อให้เกิดความโปร่งแสงเหมือนกับฟันธรรมชาติ และต้องมีความหนาของโครงโลหะที่เพียงพอเพื่อต้านทานต่อการผิดรูป Riley (49) กล่าวว่า การออกแบบโครงโลหะจะต้องเป็นไปตามความต้องการทั้งด้านกลศาสตร์และชีวภาพ (mechanical and biological demand) โดยทางกลศาสตร์ต้องการความหนาเท่าที่จะเป็นไปได้ ขณะที่ด้านชีวภาพและด้านความสวยงามต้องการความบางเท่าที่จะเป็นไปได้ นอกจากนี้การผิดรูปจะแปรผกผันกับค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ถ้าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มเป็นสองเท่าการผิดรูปสภาพยืดหยุ่น (elastic deformation) ที่เกิดขึ้นเมื่อรับแรงจะลดลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือสภาพแข็งตึงต่อหนึ่งหน่วยความหนา (rigidity per unit thickness) จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโลหะมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ดังนั้นโลหะที่มีค่ากำลังแรงดึงท้ายสุด (ultimate tensile strength) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูง จะเกิดการโค้งงอเมื่อรับแรงได้น้อยกว่าและเป็นโครงโลหะที่รองรับพอร์ซเลนที่ดีกว่าโลหะที่มีค่าทั้งสองนี้ต่ำ โดย Riley เชื่อว่าความสัมพันธ์ของการผิดรูปสภาพยืดหยุ่นต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีความสำคัญมากกว่าความสัมพันธ์ของความหนาของโครงโลหะ เนื่องจากความแข็งแรงและอายุการใช้งานของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องขึ้นอยู่กับสภาพแข็งตึงของโครงโลหะ ดังนั้นโครงโลหะจึงไม่ควรมีการงอตัวระหว่างที่ใส่ชิ้นงานและในขณะที่รับแรงบดเคี้ยว เพราะการงอตัวจะทำให้พอร์ซเลนอยู่ภายใต้แรงดึงและทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้

ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีข้อเสนอแนะและความคิดเห็นเกี่ยวกับความหนาของโครงโลหะมากมาย เช่น ความหนาที่บางที่สุดของโครงโลหะที่ทำได้ในกรณีที่เป็นโลหะผสมไร้สกล คือ 0.1-0.2 ม.ม. (20) 0.2 ม.ม. (4, 20-26) และ 0.25 ม.ม. (27) ในกรณีเป็นโลหะผสมทองหรือโลหะผสมมีสกลจะมีความหนาน้อยที่สุด 0.3 ม.ม. (4, 18, 20, 23, 28-30) 0.3-0.4 ม.ม. (25, 26, 31, 32) 0.3-0.5 ม.ม. (24, 30, 33-35) 0.4-0.5 ม.ม. (20, 22) และ 0.5 ม.ม. (21, 36, 37) แต่ไม่มีความหนาที่มากที่สุดของโลหะ (18, 30, 36)

ส่วนพอร์ซเลนที่มีข้อเสนอแนะแตกต่างกันไป เช่น ความหนาของชั้นโอเพคพอร์ซเลน คือ 0.1 ม.ม. (48) 0.2 ม.ม. (22) 0.3 ม.ม. (20, 24) 0.2-0.4 ม.ม. (46) โดยมีความหนารวมของพอร์ซเลนสม่ำเสมอ (18, 24, 29, 30) สามารถทำให้บางที่สุดได้ถึง 0.5 ม.ม. (18) 0.7 ม.ม. (24, 33) หรือ 0.75 ม.ม. (18) แต่ความหนาที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดความสวยงามจะต่างกันออกไป เช่น 1.0 ม.ม. (4, 17, 22-24, 30) 1.0-1.5 ม.ม. (18, 28, 29, 36) 1.5 ม.ม. (34, 35) นอกจากนี้ความหนาของพอร์ซเลนอาจจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งของชิ้นงาน เช่น บริเวณคอฟฟัน (gingival 1/3) ตามอุดมคติจะหนา 1 ม.ม. ขณะที่บริเวณปลายฟัน (incisal 1/3) จะหนา 1.5-2 ม.ม. เพื่อให้เกิด

ลักษณะโปร่งแสง และไม่ควรมีความหนาเกิน 2.0 มม. (4, 18, 23, 28, 30, 31, 38, 39) เนื่องจากในขั้นตอนการเย็นตัวของพอร์ซเลนจะเกิดความเค้นอัดมากที่สุดที่บริเวณรอยต่อและจะมีค่าลดลงเมื่อออกไปที่พื้นผิวด้านนอก โดยเชื่อว่าความเค้นอัดจะมีผลอยู่ในช่วง 2.0 มม. จากบริเวณรอยต่อ หลังจากระยะนี้ออกไปจะเกิดความเค้นแบบดึงขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ (18, 20, 26, 29, 65) ดังนั้นความหนาโดยรวมของพอร์ซเลนไม่ควรที่จะเกิน 2.0 มม. (4, 18, 23, 30, 31, 65) ในกรณีที่พยายามชดเชยช่องว่างที่ต้องการของชิ้นงานโดยใช้พอร์ซเลน จะทำให้พอร์ซเลนมีแนวโน้มที่จะเกิดแรงเสียดหรือแตกหัก เมื่อได้รับความเค้นจากแรงกัด (occlusal biting stress) (31) นอกจากนี้พอร์ซเลนที่มีความหนาเพิ่มมากขึ้นก็มีโอกาสที่จะเกิดรูพรุนมากขึ้น มีโอกาสเกิดการแตกหักได้มากขึ้น (36) ดังนั้นในกรณีที่มีการสูญเสียเนื้อฟันจำนวนมาก เช่น เกิดฟันผุ มีการบาดเจ็บ (trauma) หรือการแตกหัก ควรแทนที่เนื้อฟันที่เสียไปด้วยโลหะเพื่อให้เกิดความหนาที่สม่ำเสมอของพอร์ซเลน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าไม่มีความหนาที่มากที่สุดของโลหะ (18, 30, 36)

Kostka (66) กล่าวว่า บริษัทผู้ผลิตแนะนำว่าพอร์ซเลนบริเวณด้านบดเคี้ยวและปลายฟันไม่ควรหนาเกิน 2 มม. อย่างไรก็ตามในกรณีที่ออกแบบครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องแบบที่มีพอร์ซเลนคลุมทั้งซี่ ถ้าตัดครอบฟันตามแนวใกล้กลางไกลกลาง จะพบว่าบริเวณด้านประชิด (proximal surface) พอร์ซเลนจะมีความหนาในแนวด้านบดเคี้ยวคอฟัน (occluso-cervical direction) ประมาณ 8-10 มม. ซึ่งบริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่อาจเกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ ดังนั้นการออกแบบโครงโลหะที่เหมาะสมควรที่จะควบคุมไม่ให้มีพอร์ซเลนบริเวณนี้มากเกินไป โดยการรองรับพอร์ซเลนที่บริเวณนี้ด้วยโลหะ

ทันตแพทย์หลายท่านได้แนะนำเกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน ซึ่งสามารถสรุปออกมาดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงข้อแนะนำของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
1. Straussberg, Katz และ Kuwata (37)	1966	-โลหะผสมทองมีความหนาน้อยที่สุด 0.5 มม. ถ้าบางกว่านี้จะเกิดการผิกรูปภายใต้แรงที่เกิดจากการบดเคี้ยว	
2.Hobo และ Shillingburg (33)	1973	-หนา 0.3-0.5 มม. เพื่อให้เกิดความแข็งและความแข็งแรงที่เพียงพอ	-หนาน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยมีความหนาสม่ำเสมอ -ความหนาน้อยที่สุด 0.7 มม.

ตารางที่ 4 แสดงข้อเสนอแนะของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
3. Weiss (20)	1977	-โลหะผสมทองหนา 0.3 ม.ม. ในกรณี 1 ยูนิต 0.4-0.5 ม.ม. ในหลายยูนิต -โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม 0.1-0.2 ม.ม. ในกรณี 1 ยูนิต 0.2 ม.ม. ในกรณีหลายยูนิต	-ความหนาที่เหมาะสมของ โอเพคพอร์ซเลน คือ 0.3 ม.ม. ส่วนพอร์ซเลนเนื้อ ฟันหนา 0.5-2.5 ม.ม.
4. Preston (22)	1977	-โลหะผสมทองหนา 0.4-0.5 ม.ม. -โลหะผสมที่ไม่ใช่ทองหนา 0.2 ม.ม.	-ความหนาที่เหมาะสมของ โอเพคพอร์ซเลน คือ 0.2 ม.ม. ส่วนพอร์ซเลนเนื้อ ฟันหนา 0.7 ม.ม. -ความหนารวมของโครง โลหะและพอร์ซเลน 1.4 ม.ม. ในโลหะผสมทอง หรือ 1.2 ม.ม. ในโลหะผสม ที่ไม่ใช่ทอง
5. Miller (29)	1977	-น้อยที่สุด 0.3 ม.ม. เพื่อให้ เกิดความสวยงามของ เซรามิกวีเนียร์ -บริเวณด้านลิ้นและปลายฟัน ของฟันหน้าและด้านบดเคี้ยว ของฟันหลังที่รับแรง ควรเพิ่ม ความหนาเป็น 0.5 ม.ม.	-พอร์ซเลนหนาสม่ำเสมอ และไม่ควรมีความหนาเกิน 1.0-1.5 ม.ม.เพื่อที่จะได้ ควบคุมให้ได้ความสวยที่ ดีกว่า และเกิดข้อบกพร่อง จากแรงดึง (tensile flaw) น้อยที่สุด
6. Tylman (27)	1978	-ความหนาน้อยที่สุด ที่ สามารถเติมพอร์ซเลนข้างบน ได้คือ 0.25 ม.ม.	



ตารางที่ 4 แสดงข้อเสนอแนะของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
7.Lau และ Yamada (18)	1980	-ความหนาน้อยที่สุด 0.3 ม.ม. แต่อาจเพิ่มได้เพื่อให้พอร์ซเลนมีความหนา 0.75-1.5 ม.ม. ในการควบคุมสีและความแข็งแรง -ถ้าโครงโลหะมีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการรองรับ อาจทำให้พอร์ซเลนวิเนียร์เกิดการหลุด (chipping) หรือมีรอยร้าว (cracking) ได้	-โดยทั่วไปมีความหนาอย่างสม่ำเสมอในช่วง 1.0-1.5 ม.ม. -ความหนาน้อยที่สุดที่ต้องการในบริเวณที่ต้องการความสวยงามคือ 0.75 ม.ม. (พอร์ซเลนที่มีความหนา 0.75-1.5 ม.ม. สามารถทำให้เกิดสีที่เหมาะสมได้) -ความหนาของพอร์ซเลนเปลี่ยนแปลงได้จาก 0.5-1.5 ม.ม. โดยสามารถทำให้บางที่สุดได้ถึง 0.5 ม.ม. ถ้าจำเป็น แต่ความหนาที่มากที่สุดที่ทำให้เกิดความแข็งแรงและความสวยงามคือ 1.5 ม.ม. -ถ้าพอร์ซเลนหนามากกว่า 2 ม.ม. จะทำให้สูญเสียความทนแรงอัดและเกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ง่าย
8. McLean (36)	1980	-ความหนาในอุดมคติ คือ 0.5 ม.ม. -ในบริเวณที่มีการสูญเสียโครงสร้างของฟันไปและไม่สามารถทำให้เกิดรูปร่างของการกรอฟันที่ดีได้ ให้ทำการแก้ไขโดยชดเชยส่วนนั้นด้วยโลหะ	-ความหนาในอุดมคติของพอร์ซเลน คือ 1.0-1.5 ม.ม. และต้องมีส่วนของโลหะรองรับ

ตารางที่ 4 แสดงข้อเสนอแนะของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
9.Bell (31)	1983	-ความหนาในอุดมคติ คือ 0.3 - 0.4 ม.ม.	-ความหนารวมของโลหะและ พอร์ซเลนไม่ควรเกิน 2 ม.ม. เพราะจะมีแนวโน้มที่จะได้รับแรงเฉือนหรือเกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงบดเคี้ยว
10.Connor (21)	1984	ความหนาที่แนะนำ คือ 0.5 ม.ม. แต่อาจลดลงถึง 0.2 ม.ม. ได้ ถ้าต้องการพื้นที่สำหรับพอร์ซเลน	-พอร์ซเลนบริเวณตามแกน (axial) หนา 1.0 ม.ม.บริเวณปลายฟันและด้านบดเคี้ยวหนา 1.5 ม.ม. -ถ้าหนามากกว่านี้จะทำให้โครงสร้างอ่อนแอ -ถ้าบางมากกว่านี้จะ มีปัญหาเรื่องสี
11.Yamamoto (25, 26)	1985	-ความหนาน้อยที่สุด คือ 0.3-0.4 ม.ม. ในกรณีที่มีช่องว่างเหมาะสม หรือ 0.2 ม.ม. ในกรณีที่เป็นครอบฟันซี่เดี่ยว -หรือทำให้เกิดความหนาเท่าที่จะเป็นไปได้	-ความหนาน้อยที่สุดของพอร์ซเลนที่ส่วนตัวฟันหนา 1.0 ม.ม. ส่วนปลายฟันหนา 1.2 ม.ม.และมีความสูงมากที่สุด 1.5-2.0 ม.ม. -หรือความหนารวมของโลหะและพอร์ซเลนน้อยที่สุดที่ส่วนตัวฟัน คือ 1.3-1.4 ม.ม. ส่วนปลายฟันหนา 1.5-1.6 ม.ม.และมีความยาว 1.5-2.0 ม.ม.
12.Naylor (30)	1986	-ความหนาน้อยที่สุด คือ 0.3-0.5 ม.ม. ในกรณีที่เป็น 1 ยูนิต แต่ขึ้นกับชนิดของโลหะ	

ตารางที่ 4 แสดงข้อเสนอแนะของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
13. Lau และ Yamada (28)	1986	-ความหนาที่น้อยที่สุดของ โครงโลหะ คือ 0.3 มม. -แต่อาจเพิ่มความหนาของ โลหะได้เพื่อให้พอร์ซเลนมี ความหนาสม่ำเสมอในช่วง 1.0-1.5 มม.	-โดยทั่วไปมีความหนาอย่าง สม่ำเสมอในช่วง1.0-1.5 มม. -ความหนาที่น้อยที่สุดที่ ต้องการในบริเวณที่ต้องการ ความสวยงามคือ 0.75 มม. (พอร์ซเลนที่มีความหนา 0.75-1.5 มม. สามารถทำให้ เกิดสีที่เหมาะสมได้) -ความหนาของพอร์ซเลน เปลี่ยนแปลงได้จาก 0.5-1.5 มม. โดยสามารถทำให้บาง ที่สุดได้ถึง 0.5 มม. ถ้า จำเป็น แต่ความหนาที่มาก ที่สุดที่ทำให้เกิดความ แข็งแรงและความสวยงาม คือ 1.5 มม.
14.Fowler และ Tamura (30)	1987	ความหนาที่น้อยที่สุด คือ 0.3-0.5 มม. ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิด ของโลหะ	
15. Martignoni และ SchÖnenberger (34, 35)	1990	-หนาที่น้อยที่สุด 0.3-0.5 มม. -โครงโลหะต้องสามารถ ต้านทานต่อแรงบิดเคี้ยวได้ โดยไม่เกิดการผิดรูปที่เป็น สาเหตุให้เกิดการแตกหักของ พอร์ซเลน	-1.5 มม.เพื่อให้เกิดความ สวยงาม

ตารางที่ 4 แสดงข้อเสนอแนะของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
16.Yamamoto (32)	1990	- หนาน้อยที่สุด 0.3-0.4 ม.ม. - โครงโลหะที่หนากว่าจะมี ความแข็งแรงมากกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่เป็น สะพานฟัน	- ความหนารวมของโลหะ และพอร์ซเลนอย่างน้อยใน ส่วนตัวฟันหนา 1.3-1.4 ม.ม. ปลายฟันหนา 1.5-1.6 ม.ม. และยาว 1.5-2.0 ม.ม. เพื่อให้ เหมือนฟันธรรมชาติ ซึ่งต้อง สัมพันธ์กับปริมาณของฟัน หลักที่กรอแต่งไป
17.Naylor (30)	1992	- ความหนาน้อยที่สุด 0.3 ม.ม. - ไม่มีความหนามากที่สุดของ โครงโลหะ	- พอร์ซเลนควรมีความหนา สม่ำเสมอและมีการรองรับที่ เพียงพอจากโลหะ  - แต่ความหนาอาจเปลี่ยนไป ได้ตามแต่และตำแหน่งจาก 1.0 ม.ม. ในส่วนคอฟันและ มากที่สุด 1.5 - 2 ม.ม. ที่ ปลายฟันหรือด้าน บดเคี้ยว  - หนาน้อยที่สุด 1 ม.ม. และ มากที่สุด 2 ม.ม.  - พอร์ซเลนที่ไม่ได้ถูกรองรับ ด้วยโลหะไม่ควรมีความหนา มากกว่า 2.0 ม.ม. เพราะ อาจ ทำให้เกิดความล้าเหลวได้
18.Shillingberg et al. (24)	1997	- 0.3-0.5 ม.ม. สำหรับโลหะมี สกุล และ 0.2 ม.ม. สำหรับ โลหะพื้นฐานเพื่อให้เกิดความ แข็งและความแข็งแรงที่ เพียงพอ	- ความหนาน้อยที่สุดใน บริเวณที่ต้องการความ สวยงามคือ 0.7 ม.ม. แต่ที่ ต้องการ คือ หนาสม่ำเสมอ 1 ม.ม. ซึ่งได้จากกรกำหนด ความหนาของโครงโลหะ

ตารางที่ 4 แสดงข้อเสนอแนะของทันตแพทย์ท่านต่างๆ เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลน

ผู้เสนอ	ปี	ความหนาของโลหะ	ความหนาของพอร์ซเลน
19. Rosenstiel, Land และ Fujimoto (4, 23)	2001	-หนาน้อยที่สุด 0.3 มม. สำหรับโลหะมีสกุล และ 0.2 มม. สำหรับโลหะพื้นฐาน เพื่อสามารถที่จะต้านทานต่อการผิครูประหว่างที่มีการเผา	-ความหนามากที่สุดที่ต้องการคือ 2 มม. เพื่อป้องกันการแตกหักของพอร์ซเลน -ความหนาน้อยที่สุดคือ 1 มม. เพื่อให้เกิดความสวยงาม

ในงานรากฟันเทียมการเลือกสิ่งบูรณะด้วยครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องถือว่าเป็นมาตรฐานหรือเป็นตัวเลือกแรกๆ ที่เลือกใช้ในผู้ป่วยที่มีช่องว่างไว้ฟันบางส่วน (67) สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาถึงคือระยะระหว่างขากรรไกร (interarch space) ในกรณีที่มีระยะระหว่างขากรรไกรมาก และต้องการการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องควรที่จะชดเชยช่องว่างนี้ด้วยโครงโลหะ เพื่อให้เกิดความแข็งแรงและป้องกันการผิครูปของโครงโลหะ ซึ่งจะลดการแตกหักของพอร์ซเลน นอกจากนี้การชดเชยช่องว่างด้วยโลหะยังเป็นการควบคุมความหนาของพอร์ซเลนให้มีความหนาที่สม่ำเสมอและหนาไม่เกิน 2 มม. เนื่องจากถ้าพอร์ซเลนมีความหนามากกว่านี้ จะมีโอกาสที่จะเกิดการแตกหักมากขึ้น (18, 25, 26, 30, 32, 36, 68) ในทางตรงกันข้ามการที่มีโลหะอยู่จำนวนมาก โลหะจะทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บความร้อน (heat sink) และเกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างชิ้นงาน เนื่องจากการเย็นตัวของโลหะหลังจากที่ทำการหล่อ ส่วนของโลหะที่บางจะเย็นตัวก่อนและจะเกิดรูพรุนในโครงสร้างชิ้นงาน อาจนำไปสู่การหักของโครงโลหะได้เมื่อได้รับแรง นอกจากนี้แล้วชิ้นหล่อ (casting) จะถูกนำเข้าสู่เตาหล่ออีกครั้งเพื่อขึ้นรูปพอร์ซเลน การที่โลหะในแต่ละบริเวณมีความหนาไม่เท่ากันทำให้ความร้อนที่อยู่ในโลหะแต่ละบริเวณต่างกัน ส่งผลให้มีโอกาสที่พอร์ซเลนจะแตกเพิ่มมากขึ้น (68)

## 2.2 ตำแหน่งของสัมผัสสบฟัน สัมผัสประชิดและการขยายพื้นที่ของวีเนียร์

Naylor (30) กล่าวว่า ตำแหน่งของสัมผัสสบฟันในตำแหน่งในศูนย์กลางของการบูรณะฟันด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องจะเป็นพอร์ซเลนหรือโลหะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 อย่าง คือ ตำแหน่งของจุดสัมผัสด้านบดเคี้ยว (location of occlusal contacts) และปริมาณของระยะปลอด (clearance) ที่ทำการกรอดกับฟันคู่สบ โดยจุดสัมผัสสบฟันในตำแหน่งในศูนย์กลางจะเป็นโลหะหรือ

พอร์ซเลนก็ได้ ในกรณีที่เป็นโลหะ ด้านบดเคี้ยวจะมีความถูกต้องมากกว่าพอร์ซเลน ทำให้ฟันคู่สบสึกน้อยกว่า การกรอและขัดแต่งข้างเก๊าจะง่ายกว่า ขณะที่จุดสัมผัสที่เป็นพอร์ซเลนเวลากรอจะมีการกรอส่วนที่เคลือบ (glaze) ออกไป (4, 30, 33, 36) นอกจากนี้จุดสัมผัสในตำแหน่งในศูนย์และในตำแหน่งที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ออกนอกศูนย์ (centric occlusal contact & initial excursive movement) ไม่ควรอยู่ที่รอยต่อระหว่างโลหะและพอร์ซเลน เนื่องจากจุดสัมผัสที่อยู่ใกล้หรืออยู่ที่รอยต่อ ขณะที่มีการใช้งานส่วนโลหะจะมีการไหลของโลหะ (metal flow) มีการโค้งงอและมีการผิกรูขึ้น ส่วนพอร์ซเลนจะมีความเค้นแบบดึงเกิดขึ้น ซึ่งเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการหลุดหรือแตกหักของพอร์ซเลนที่บริเวณนั้น (18, 21, 24, 30, 36) ในฟันหน้าไม่แนะนำให้รอยต่ออยู่ที่บริเวณปลายฟัน เพราะในทุกๆการเคลื่อนที่เวลาที่มีการสัมผัสกันจะทำให้เกิดความเค้นที่ปลายฟันส่งผลให้เกิดแรงเฉือนที่พอร์ซเลนที่อยู่ด้านหน้าทำให้เกิดการแตกหักตามมาได้ และจะทำลายความโปร่งแสงบริเวณปลายฟัน (21, 24, 37) โดยจุดสัมผัสในตำแหน่งในศูนย์ต้องห่างจากรอยต่อประมาณ 1.0-2.0 มม. (4, 24, 30, 33)

*ส่วนตำแหน่งของสัมผัสประชิด* ในฟันหน้าหรืออย่างน้อยจุดสัมผัสประชิดด้านใกล้ของฟันหลัง ควรที่จะเป็นพอร์ซเลนเพื่อให้เกิดความสวยงาม เนื่องจากมองไม่เห็นรอยดำของจุดสัมผัสประชิดที่เป็นโลหะ นอกจากนี้ยังง่ายในการกรอแต่งและนำไปเผาอีกครั้ง (easily adjusted by grinding & refiring) และง่ายต่อการทำความสะอาด แต่สิ่งที่สำคัญคือ ต้องมีโลหะที่เป็นตัวรองรับให้กับสันริมฟันที่เป็นพอร์ซเลน (porcelain marginal ridge) เพื่อป้องกันการแตกหัก ส่วนฟันหลังในบริเวณที่มองไม่ค่อยเห็นและเป็นการรักษาเนื้อฟันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ควรมีตำแหน่งของสัมผัสประชิดอยู่บนโลหะ นอกจากนี้ตำแหน่งของสัมผัสประชิดไม่ควรวางอยู่ที่รอยต่อระหว่างโลหะและพอร์ซเลน (4, 24, 30, 33)

*การขยายฟันที่ของวิเนียร์หรือการออกแบบชิ้นงานของการบูรณะด้วยโลหะเคลือบ* กระเบื้องมีหลายแบบด้วยกัน ดังต่อไปนี้ ในฟันหน้า 1) มีพอร์ซเลนปกคลุมทั้งหมด (full porcelain coverage) แต่มีแคบคาดโลหะ (metal collar) ด้านลิ้น ซึ่งมีความกว้างในแนวปลายฟันคอฟันประมาณ 3 มม. (24, 33) เนื่องจากจะช่วยลดความเค้นที่เกิดขึ้นบนพอร์ซเลน และทำหน้าที่ในการให้การรองรับกับพอร์ซเลน (porcelain support) ให้เค้ารูป (contour) และให้ขอบที่แนบ (marginal fit) (21, 36) 2) ด้านใกล้ลิ้นเป็นโลหะ จะใช้ในกรณีที่มีระยะปลอดน้อยกว่า 1.5 มม. หรือในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น ในการยึดแบบติดแน่น (fixed splinting) หรือโครงโลหะของสะพานฟัน หรือใช้ในกรณีที่จุดสัมผัสสบฟันอยู่ใกล้บริเวณปุ่มคอฟัน (cingulum) บริเวณสันริมฟันเป็นโลหะแต่บริเวณปลายฟันก็ยังคงเป็นพอร์ซเลนและขยายไปทางด้านใกล้กลางและไกลกลางให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งการออกแบบลักษณะนี้จะไม่เสียความแข็งแรงและยังเกิดความสวยงามด้วย หรืออีกกรณีหนึ่งให้บริเวณสัมผัสประชิดเป็นพอร์ซเลน เพื่อให้มีการส่องผ่านของแสง

มากที่สุด (37) ส่วนในฟันหลัง 3) มีพอร์ซเลนเฉพาะด้านหน้า นอกนั้นเป็นโลหะ (facial window) 4) พอร์ซเลนขยายไปถึงหนึ่งในสามหรือครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างยอดปุ่มฟันถึงร่องกลาง (central groove) ซึ่งสิ่งที่ต้องการคือ พอร์ซเลนต้องไม่มีการซ้อนทับกัน (overlap) บนโลหะและไม่มีลักษณะเป็น feather edge เพราะว่าพอร์ซเลนบริเวณนี้จะบาง แดกหักได้ง่ายและมีโอกาสที่ออกไซด์ของโลหะหรือโอเพนโพล์ขึ้นมาที่บริเวณนี้ด้วย ดังนั้นขอบของพอร์ซเลนควรที่จะมีจุดสิ้นสุดเป็นข้อต่อ (butt joint) หรือแนวบรรจบด้านนอก (external line angle) เป็นมุม 90 องศา เพื่อให้พอร์ซเลนมีความหนาสม่ำเสมอ และให้เค้ารูปบริเวณรอยต่อและลักษณะกายภาพ (anatomy) ของครอบฟันได้ถูกต้อง (24, 30, 36) 5) พอร์ซเลนปกคลุมด้านบดเคี้ยวทั้งหมด 6) พอร์ซเลนคลุมโครงโลหะทั้งหมด ใช้ในกรณีที่ต้องการความสวยงาม แต่ควรที่จะมีแถบคาดโลหะด้านใกล้ลิ้น 2.0-3.0 มม. 7) ด้านบดเคี้ยวเป็นพอร์ซเลนและมีส่วนที่เป็นโลหะรองรับที่บริเวณสันริมฟัน (interproximal strut) ซึ่งส่วนที่เป็นโลหะรองรับจะทำหน้าที่ในการรองรับพอร์ซเลนที่สันริมฟัน โดยทางด้านใกล้กลางและไกลกลางจะต่อเนื่องไปกับแถบคาดโลหะด้านริมฝีปากและด้านลิ้น ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงกับโครงโลหะอย่างมาก เพื่อต้านทานกับแรงบิด (torsional force) และแรงที่ทำให้เกิดการผิดรูป (distortion force) อื่นๆ โดยส่วนที่เป็นโลหะรองรับควรที่จะอยู่ใต้จุดสัมผัสเพื่อให้เกิดความสวยงามและมีการรองรับของพอร์ซเลน เนื่องจากพบว่ามีการแตกหักของพอร์ซเลนบริเวณสันริมฟันซึ่งมีพอร์ซเลนหนา 8-10 มม. การที่ไม่มีส่วนที่เป็นโลหะรองรับจะทำให้พอร์ซเลนอ่อนแอต่อแรงบดเคี้ยว โดยพอร์ซเลนมีแนวโน้มที่จะเกิดการเลื่อน (shift) หรือการเฉือน (shear) เมื่อมีความหนามากเกินไป (31, 66) 8) นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบอย่างอื่นได้ เช่น ให้ด้านบดเคี้ยวมีทั้งส่วนที่เป็นโลหะและพอร์ซเลน (24)

ได้มีการศึกษาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีการออกแบบโครงโลหะต่างๆกัน แต่ข้อสรุปที่ได้ก็แตกต่างกันไปตามแต่ละการทดลอง เช่น การศึกษาของ Lund และ Barber (69) Walton และ O'Brien (70) รวมไปถึง Nielsen และ Tuccillo (71) ที่พบว่ากรอบแบบให้มีพอร์ซเลนเฉพาะด้านหน้าจะมีความแข็งแรงมากที่สุด ซึ่งมากกว่าแบบที่มีพอร์ซเลนขยายไปถึงครึ่งซี่ แบบที่มีพอร์ซเลนขยายไปคลุมปุ่มฟันด้านแก้มและแบบที่มีพอร์ซเลนคลุมด้านสบฟันทั้งหมด และพบว่ารอยร้าวและความเค้นตัก้างในการออกแบบที่มีพอร์ซเลนคลุมด้านสบฟันทั้งหมดมีมากกว่ากรอบแบบที่มีพอร์ซเลนเฉพาะด้านหน้า ส่วน Marker et al. (72) พบว่าการออกแบบด้านสบฟันในฟันหลังแบบที่มีพอร์ซเลนคลุมปุ่มฟันทางด้านหน้า สามารถต้านทานการแตกหักของพอร์ซเลนได้ดีกว่าที่มีด้านสบฟันเป็นแบบพอร์ซเลนครึ่งซี่และแบบพอร์ซเลนทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและทาง กลศาสตร์ของโลหะรวมถึงความเค้นตัก้างที่บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะและพอร์ซเลน มีผลต่อการแตกหักมากกว่ากรอบแบบโครงโลหะ ในขณะที่ McLean (36) Stein และ Kuwata (17) Miller (65) และ

Jarvis (69) สนับสนุนการออกแบบครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีด้านสบฟันเป็นพอร์ซเลนทั้งหมด เนื่องจากเชื่อว่าการเพิ่มบริเวณของพอร์ซเลนวิเนียร์จะช่วยเพิ่มความแข็งแรง

### 2.3 การออกแบบขอบด้านหน้า

ครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันจำแนกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ 1) ชนิดขอบโลหะ ด้านหน้าเป็นแถบคาด (metal collar) ขนาดประมาณ 0.5-1 มม. เพื่อรองรับพอร์ซเลน ใช้ในบริเวณที่ไม่ต้องการความสวยงามมากนัก เนื่องจากตัวโครงโลหะมีความแข็งตึง (rigid) สามารถต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอันเกิดเนื่องมาจากการเผาพอร์ซเลนและการบดเคี้ยวอาหารได้ มีความแนบสนิทของขอบ (marginal adaptation) ที่ดี มีวิธีการทำที่ไม่ยุ่งยาก แต่ไม่สวยงาม เพราะจะมองเห็นขอบโลหะสีเงินบริเวณคอฟัน และโลหะมีดัชนีการสะท้อนแสง (reflective index) ที่ไม่ดี ทำให้การส่องผ่านของแสง (light transmission) ไปสู่คอฟันเสียไปจึงเห็นเป็นเงาดำ (darkened appearance) ของทั้งบริเวณฟันและขอบเหงือก (25) จึงมีการซ้อนขอบไว้ได้เหงือก แต่ในกรณีที่ผู้ป่วยมีเหงือกที่บางใส ยังคงมองเห็นเงาสีทองของขอบโลหะได้ขอบเหงือกได้ นอกจากนี้การทำความสะอาดก็ยากขึ้น ตรวจหาความผิดปกติของขอบครอบฟันยาก และมักทำให้เกิดเหงือกกร่น (gingival irritation หรือ gingival recession) ตามมา และ 2) ชนิดขอบพอร์ซเลน (collarless porcelain margin, porcelain margin) ซึ่งใช้กันมากในการบูรณะฟันหน้า โดยเฉพาะในบริเวณที่มี high smile line และบริเวณที่มีขอบเหงือกบาง เนื่องจากให้ความสวยงาม เพราะมีการกำจัดเส้นสีดำของขอบโลหะและลดการเกิดเงาดำจากการสะท้อนแสงของโลหะ จึงไม่จำเป็นต้องซ้อนขอบไว้ได้เหงือก ลดการระคายเคืองและลดการเกิดเหงือกอักเสบลง แต่ชิ้นงานที่ได้ยังคงมีความทึบแสงอยู่ เนื่องจากโครงโลหะที่อยู่ข้างใต้เป็นวัตถุทึบแสง (opaque material) ป้องกันไม่ให้แสงส่องผ่านได้ (4, 25, 26)

นอกจากนี้การออกแบบขอบด้านหน้าชิ้นงานของการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องยังสามารถแบ่งตามรูปแบบของการเตรียมฟันหลักแบบต่างๆ คือ 1) knife-edge 2) chamfer 3) shoulder 4) slope shoulder และ 5) shoulder with bevel (22, 24-26, 30, 36, 73) ซึ่งสามารถสรุปถึงข้อได้เปรียบข้อเสียเปรียบ ข้อบ่งชี้ของการออกแบบขอบด้านหน้าชนิดต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 5



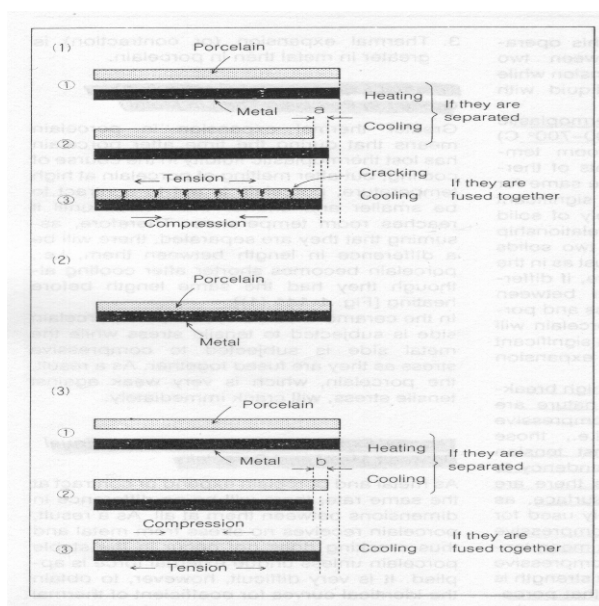
ตารางที่ 5 แสดงข้อได้เปรียบ ข้อเสียเปรียบ ข้อบ่งชี้ของการออกแบบขอบด้านหน้าชนิดต่างๆ

ขอบด้านหน้า	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ	ข้อบ่งชี้
Knife-edge	Conservative of tooth structure	Does not provide sufficient bulk	Not recommended
Chamfer	Distinct margin, adequate bulk, easier to control	Care needed to avoid unsupported lip of enamel	Cast metal restorations, lingual margin of PFM crowns
Shoulder	Bulk of restorative material	Less conservative of tooth structure	Facial margin of PFM crowns, complete ceramic crowns,
Sloped shoulder	Bulk of material, removed unsupported enamel, allows finishing of metal	Less conservative of tooth structure	Facial margin of PFM crowns
Shoulder with bevel	Bulk of material, removed unsupported enamel, allows finishing of metal	Less conservative , extends preparation apically	Facial margin of posterior PFM crowns with supragingival margins

(ที่มา Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. Principles of tooth preparation. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. Third ed. St. Louis: Mosby; 2001. p. 175.)

### 3. การเข้ากันได้ของโลหะและพอร์ซเลน (compatibility of the metal and the porcelain)

ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนระหว่างโลหะและพอร์ซเลนจะส่งผลให้เกิดความเค้นในพอร์ซเลน เนื่องจากการที่พอร์ซเลนมีการหดตัวที่มากกว่าหรือน้อยกว่าโครงโลหะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของความไม่เข้ากัน (mismatch) ของวัสดุทั้งสอง เมื่อพอร์ซเลนถูกหลอมและเชื่อมกับโลหะ จะมีความสัมพันธ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้เกี่ยวกับการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน 3 อย่าง (26, 62) คือ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์  
ของโลหะและพอร์ซเลนที่  
สามารถเกิดขึ้นได้เกี่ยวกับการ  
ขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน

(ที่มาจาก Yamamoto M. Factors  
affecting the strength of metal-

ceramics. Metal-ceramics;

台口口口口口 榎 榎  
艘口口 榎 榎 口 of

Makoto Yamamoto. Chicago:

Quintessence; 1985. p.160)

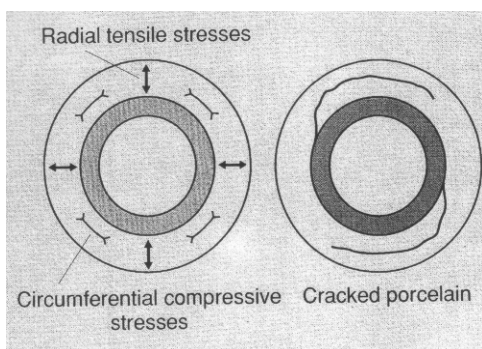
1)ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอร์ซเลนมีค่ามากกว่าของโลหะ เมื่อมีการเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้องพอร์ซเลนจะหดตัวมากกว่าโลหะ ส่งผลให้พอร์ซเลนอยู่ภายใต้แรงดึงขณะที่โลหะจะอยู่ภายใต้แรงอัด โดยความเค้นแบบดึงส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะและพอร์ซเลน ดังนั้นรอยร้าวที่เกิดขึ้นมักจะพบในบริเวณที่พอร์ซเลนบาง เช่น บริเวณคอฟัน (cervical region) รอบๆบริเวณที่บัดกรี (soldered area) หลังจากที่ผ่านมากระบวนการบัดกรีภายหลัง (postsoldering procedures) รอยร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะไม่มิติศทางที่แน่นอน เนื่องจากพอร์ซเลนถูกดึงด้วยโลหะ เรียกรอยร้าวชนิดนี้ว่า รอยร้าวแรงดึง (cracking due to tension)

2)ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอร์ซเลนและโลหะมีค่าเท่ากันทั้ง พอร์ซเลนและโลหะจะหดตัวด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน จึงไม่เกิดความแตกต่างของขนาดที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและพอร์ซเลน ผลที่ได้คือพอร์ซเลนจะไม่มี ความเค้นที่เกิดจากโลหะ ดังนั้นจึงไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นกับพอร์ซเลน ยกเว้นจะได้รับแรงจากภายนอกที่มีค่ามากพอมากระทำ

3)ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอร์ซเลนมีค่าน้อยกว่าของโลหะ โลหะจะหดตัวมากกว่าพอร์ซเลนและจะทำให้พอร์ซเลนอยู่ภายใต้แรงอัดขณะที่โลหะจะอยู่ภายใต้แรงดึง เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำจะเกิดแรงเค้นดึงขึ้นที่พื้นผิวของพอร์ซเลน แรงนี้จะถูกหักล้างไปได้โดยแรงเค้นที่อัดค้างอยู่ ส่งผลให้พอร์ซเลนมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งจะลดแนวโน้มที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหัก อย่างไรก็ตามการบูรณะฟันทางคลินิก พอร์ซเลนจะเชื่อมบนโครงโลหะที่มีความโค้งหรือมีรูปร่างกลมมากกว่าที่มีรูปร่างแบนหรือเป็นเส้นตรง ดังนั้นเมื่อมีการเย็นตัวลงจะเกิดความเค้นแบบดึงและความเค้นอัดขึ้นทั้งแบบที่มีทิศทางออกจากศูนย์กลาง (radial direction) และแบบที่มีทิศทางรอบวง (circumferential direction) โดยความเค้นที่มากที่สุด

ในทิศทางออกจากศูนย์กลาง จะพบมากที่บริเวณรอยต่อและจะมีค่าน้อยลงเมื่อออกไปข้างนอก ความเค้นอัดโดยรอบ (circumferential compressive stress) ที่เกิดขึ้นถือว่าเป็นข้อดี ขณะที่การเกิดความเค้นแบบดึงออกจากศูนย์กลาง (radial tensile stress) ถ้ามากพอจะเป็นสาเหตุของการเกิดแยกตัวออกจากกันระหว่างพอร์ซเลนและโลหะได้ ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของโลหะมากกว่าของพอร์ซเลนมากๆ ความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ก็จะมีความมากขึ้น เนื่องจากโลหะสามารถที่จะดัดแปลงได้ง่ายและสามารถที่จะผิดรูปได้โดยไม่เกิดการแตกหัก จึงเกิดรอยร้าวหรือการแตกหักเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นพอร์ซเลนแทน หรือเกิดการแยกตัวของพอร์ซเลน (debonding) ออกจากผิวโลหะ (ภาพที่ 2) ซึ่งจะพบมากในบริเวณที่มีรัศมีความโค้ง (radius of curvature) ต่ำที่สุด เช่นบริเวณปลายฟัน นอกจากนี้ถ้าสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างมีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะมี ความเค้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเห็นได้ทางคลินิกที่ครอบฟันซึ่งเดียวพบการแตกหักน้อยกว่าในกรณีที่เป็นสะพานฟัน เรียก รอยร้าวที่เกิดขึ้นชนิดนี้ว่า รอยร้าวแรงอัดเกิน (cracking due to overcompression)

เพื่อป้องกันรอยร้าวหรือการแตกหักที่เกิดจากการมีความเค้นแบบดึง หรือความเค้นอัดที่มากเกินไป โลหะควรที่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนมากกว่าพอร์ซเลนประมาณ  $0.5-1.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$



ภาพที่ 2 แสดงรอยร้าวของโลหะเคลือบกระเบื้อง เนื่องจากมีความเค้นแบบดึงตกค้าง เมื่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนของพอร์ซเลนมีค่าน้อยกว่าของโลหะมากเกินไป

(ที่มา Noort R. Metal-bonded ceramics. Introduction to dental ceramics. 2<sup>nd</sup> ed. Edinburgh: Mosby; 2002, p. 251.)

**ความล้มเหลวของการบูรณะฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้อง** ถือว่าเป็นปัญหาที่เกิดจากหลายปัจจัย (multi-factorial problem) ซึ่งอาจเกิดร่วมกัน ได้แก่

การออกแบบสิ่งบูรณะที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม (6, 12, 14-16, 74) เป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อความแข็งแรงของโลหะเคลือบกระเบื้อง (17, 18, 26, 36) ดังนั้นควรออกแบบให้โครงโลหะมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานต่อการผิดรูป ซึ่งเกิดขึ้นได้ระหว่างที่มีการขึ้นรูปพอร์ซเลนจากขั้นตอนการสร้างออกไซด์โลหะบนโครงโลหะ การหดตัวของพอร์ซเลนระหว่างที่มีการเผา ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนระหว่างโลหะและพอร์ซเลนที่ใช้ การออกแบบโครงโลหะ การกรอแต่งฟันหลัก และปลดปล่อยความเค้นที่เกิดขึ้นจาก

การหล่อขึ้นงาน (casting-induced stress) (16) โดย Coornaert et al. (2) สํารวจพบว่ามื้อตราความล้้มเหลวเชิงกลที่เกิดจากการแตกหักของพอร์ซเลนจากการออกแบบโครงโลหะที่ไม่ถูกต้องถึง 23.08 % และเกิดจากการออกแบบโครงโลหะที่ไม่เหมาะสมกับลักษณะการสปันถึง 13.46 %

การกรอแต่งพื้นหลักที่ไม่ดี (6, 14-16, 75) เช่น การกรอแต่งพื้นที่มีแนวบรรจบที่เป็นมุมแหลม (acute line angle) อาจทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆในพอร์ซเลนเพิ่มขึ้นระหว่างขั้นตอนการเผา (75) รวมไปถึงการกรอแต่งพื้นแล้วมีระยะปลอดการสปันน้อยหรือมากเกินไปสำหรับโครงโลหะและพอร์ซเลน (6, 14, 16) ส่งผลให้โครงโลหะที่ได้บางและเกิดการโค้งงอของโลหะขณะใช้งานตามมาด้วยการแตกหักของพอร์ซเลน ซึ่ง Coornaert et al. (2) พบความล้้มเหลวนี้ที่เกิดขึ้นจากการที่มีความหนาของโครงโลหะน้อยเกินไปถึง 13.46 % หรือการมีพอร์ซเลนที่หนาเกินไปก็ส่งผลให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้

ความแตกต่างอย่างมากของค่ามอดูลัสระหว่างโลหะและพอร์ซเลน ทำให้เกิดความล้้มเหลวเชิงกลเกิดขึ้น (14-16) การไม่เข้ากันของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนระหว่างโครงโลหะและพอร์ซเลน (6, 14) ทำให้เกิดความเค้นในพอร์ซเลน เนื่องจากการที่พอร์ซเลนมีการหดตัวที่มากกว่าหรือน้อยกว่าโครงโลหะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของความไม่เข้ากันของวัสดุทั้งสอง ส่งผลให้เกิดรอยร้าวหรือการแตกหักของพอร์ซเลนได้ (26, 62)

การมีรอยตำหนิขนาดเล็ก (microdefects) หรือมีรอยร้าวเล็กๆ มีความพรุนหรือฟองอากาศในพอร์ซเลน (6, 12, 14) เกิดขึ้นได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปพอร์ซเลนจากกระบวนการอัดแน่น การหลอมละลาย และการเผา เกิดจากการกรอแก้ไข หรือมีอยู่ในลักษณะโครงสร้าง (microstructure feature) ตามธรรมชาติของพอร์ซเลนเอง (19) โดย Yamamoto (26) กล่าวว่าการที่มีรอยร้าวเล็กๆเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีความเค้นภายในเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของรอยร้าว เนื่องจากการสะสมความเค้นเกิดขึ้นที่จุดปลาย (end) ของรอยร้าว เมื่อมีแรงมากระทำที่พื้นผิว ก็จะเกิดการแพร่ขยายให้รอยร้าวมีขนาดกว้างขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านแรงต่อการแตกหักมีค่าลดลง นอกจากนี้การที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อถูกความร้อนแตกต่างกัน เมื่อพอร์ซเลนเย็นตัวลง ผลึกโลหะที่จะมีการหดตัวมากกว่าส่วนที่เป็นแก้วที่อยู่ล้อมรอบ ส่งผลให้เกิดความเค้นแรงอัดรอบๆอนุภาคโลหะและทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆภายในและรอบๆผลึก ดังนั้นจึงมีการแนะนำว่าพอร์ซเลนไม่ควรมีความหนาที่ถูกต้องและสม่ำเสมอเกินไป เพื่อให้มีการสร้างรอยร้าวเล็กๆน้อยที่สุดขณะที่มีการเผาพอร์ซเลน นอกจากนี้จากการศึกษาการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์ (finite element analysis) แสดงให้เห็นว่าการมีช่องว่าง (void) ในโครงสร้างของพอร์ซเลนจะมีผลอย่างมากต่อการแตกหัก (76)

การมีรอยขีดข่วนที่พื้นผิวพอร์ซเลน (14) Lamon และ Evans ในปี 1983 กล่าวว่า รอยขีดข่วนเพียงเล็กน้อยในลักษณะรอยบากแหลมบริเวณจุดยอดของรอยขีดข่วน จะมีช่องว่างขนาดเล็กเท่ากับระยะระหว่างอะตอมของวัสดุ ซึ่งบริเวณนี้จะมีการสะสมความเค้นเกิดขึ้น ความเค้นนี้จะสัมพันธ์กับความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อวัสดุได้รับแรงที่มีค่ามากกว่าความแข็งแรงของ บริเวณจุดยอดของรอยบาก แรงยึดที่บริเวณจุดยอดจะถูกทำลาย ขณะที่มีการแพร่ขยายของรอยแตก ผ่านตลอดทั้งหมดของวัสดุก็ยังคงมีการสะสมความเค้นที่บริเวณจุดยอดจนกระทั่งเกิดการแตกหัก ตามมา นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของโครงสร้าง (microstructure) หรือการเตรียม พื้นผิว (surface treatment) ก็เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากต่ออายุการใช้งานของ ชิ้นงานบูรณะ การได้รับความเค้นและความเครียด (strain) ซ้ำๆ เป็นสาเหตุให้เกิดการเจริญเติบโต ของรอยร้าวอย่างช้าๆและเกิดความล้าเชิงกล (mechanical fatigue) ขึ้น

การผิดพลาดทางเทคนิคหรือข้อบกพร่องทางห้องปฏิบัติการ เช่น ในขั้นตอนการ ขึ้นรูปพอร์ซเลนก็มีโอกาสทำให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในพอร์ซเลน เป็นเหตุให้เกิดความอ่อนแอและ เกิดการแตกหักที่ตำแหน่งนั้นได้ (6, 14, 16) นอกจากนี้การปนเปื้อน โดยเฉพาะในขั้นตอนการ เตรียมสภาพพื้นผิวของโลหะก่อนพอกพอร์ซเลน ถ้ามีการปนเปื้อนเกิดขึ้นจะไปลดการยึดติด ระหว่างโลหะและพอร์ซเลน ส่งผลให้เกิดการล้าเหลวตามมาได้ (15, 16, 24)

การได้รับแรงลักษณะรอบเดียว (single load cycle) เช่น แรงกระแทก ทำให้เกิด รอยร้าวขึ้นที่บริเวณพื้นผิวสัมผัส และจะมีการสะสมความเสียหายเกิดขึ้นระหว่างที่มีการรับ แรง (6, 12) รวมไปถึงแรงล้า หรือการได้รับแรงพลวัตซ้ำหลายครั้ง (repetitive dynamic loading) ซึ่ง เกิดได้จากการบดเคี้ยว การทำงานนอกหน้าที่ เช่น การนอนกัดฟัน และแรงสบฟันภายในช่องปาก ทำให้เกิดการเริ่มต้นของการร้าว (crack initiation) และเกิดการแพร่ขยายของรอยแตก (crack propagation) ในที่สุดจะเกิดการแตกหักตามมา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความล้าที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญสำหรับการบูรณะด้วยโครงโลหะเคลือบกระเบื้อง (6, 12, 16) นอกจากนี้การสบก่อน ตำแหน่งกำหนด หรือการบาดเจ็บเหตุสบฟัน ซึ่งอาจเกิดเนื่องมาจากการบันทึกการสบฟันไม่ถูกต้อง และไม่ได้ตรวจสอบการสบฟันอย่างถูกต้องเหมาะสม จะส่งผลให้เกิดบริเวณที่มีความเค้นใน พอร์ซเลน (6, 14-16) และการมีแรงกัดที่มาก ทำให้เกิดความเสียหายต่อแก้วที่มีอยู่ในสิ่งบูรณะ (14)

สิ่งแวดล้อมในช่องปาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้รับความชื้น (19) จากการศึกษา ของ Sherill และ O' Brein ในปี 1974 พบว่าความแข็งแรงของโลหะเคลือบกระเบื้องจะลดลง 20-30 % เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้น Michalske และ Freeiman ในปี 1982 แสดงให้เห็นว่า พันธะซิติเกิดในแก้วเซรามิกง่ายที่จะเกิดการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) เมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มี

ความชื้น ส่งผลให้เกิดความเค้นเชิงกลขึ้น ส่วน Dauskardt, Marshall และ Ritchie ในปี 1990 กล่าวว่าพันธะซิกอนออกซิเจนระหว่างโลหะและพอร์ซเลนจะอ่อนแอลงเมื่อได้รับความชื้น ซึ่งส่งเสริมให้เกิดความล้าเหลวตามมา เนื่องจากมีแพร่ขยายของน้ำที่จุดยอดของรอยร้าว (14) นอกจากนี้ Yamamoto (26) กล่าวว่าในภาวะที่มีความชื้น จะมีการขยายขนาดของรอยร้าวขึ้นจากผลของ wedge effect ที่มีการดูดซึมของน้ำเข้าไปในรอยร้าว ส่งผลให้ความแข็งแรงของพอร์ซเลนลดลง นอกจากนี้การคืบเครื่องคืบที่มีความเป็นกรดสูง (low pH) ก็เป็นสาเหตุให้เกิดการแตกหักของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องได้ เนื่องจากจะทำลายแก้วที่อยู่ในสิ่งบูรณะ (14)

โดยส่วนใหญ่ของการแตกหักของพอร์ซเลนเกิดขึ้นในระหว่างที่มีการเคี้ยวอย่างปกติมากกว่าที่เกิดจากการได้รับบาดเจ็บ (trauma) หรือได้รับอุบัติเหตุบางอย่าง (6)

ความซับซ้อนของสิ่งแวดล้อมในช่องปากและความหลากหลายของลักษณะพื้นผิว (surface topography) ของสิ่งบูรณะทำให้เป็นการยากที่จะอธิบายได้อย่างถูกต้องชัดเจนถึงขนาดและรูปแบบของความเค้นที่ส่งเสริมให้เกิดการแตกหักทางคลินิก การศึกษาทางห้องปฏิบัติการไม่สามารถที่จะจำลองความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในช่องปากและความซับซ้อนของสิ่งแวดล้อมในช่องปากได้ เมื่อยึดสิ่งบูรณะเข้าในปากแล้วปัจจัยอื่นๆ ที่นอกเหนือไปจากความแข็งแรงเชิงกลศาสตร์ของวัสดุเองก็จะเข้ามามีบทบาท ภายใต้การได้รับแรงเชิงกล (mechanical environmental load) การดำเนินต่อไปของความเสียหาย (progressive degradation) อาจนำไปสู่การเริ่มต้นของการร้าว และเกิดการแพร่ขยายของรอยแตก ในที่สุดจะเกิดการแตกหักตามมา

การแตกหักของพอร์ซเลนที่พบได้ทางคลินิก (77) แบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. การแตกหักในชั้นพอร์ซเลนอย่างเดียวโดยไม่ถึงชั้นของโลหะ (cohesive)
2. การแตกหักในชั้นพอร์ซเลนและชั้นของโลหะ (cohesive and adhesive)
3. การแตกหักจนถึงชั้นของโลหะ (adhesive)

ในอดีตถึงปัจจุบันได้มีผู้ทำการศึกษามากมายเกี่ยวกับการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีผลกับความต้านทานต่อการแตกหักของพอร์ซเลน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

#### 1) เกี่ยวกับชนิดของการออกแบบโลหะเคลือบกระเบื้อง

Warpeha และ Goodkind (78) ทำการทดสอบการต้านทานการแตกหักของการออกแบบโครงโลหะ 3 ชนิด โดยใช้แรงอัด พบว่าบริเวณปุ่มฟันที่เป็นมุมแหลมมีความต้านทานต่อการแตกหักต่ำกว่ามุมมนและมุมปานกลางอย่างมีนัยสำคัญ

**Wood และ Cavazos (79)** ได้ทำการศึกษาผลของมุมต่างๆของรอยต่อของพอร์ซเลนและโลหะ และระยะห่างที่เหมาะสมของจุดสัมผัสด้านบดเกี่ยวกับรอยต่อของพอร์ซเลนและโลหะ จากการทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างมุมต่างๆของรอยต่อของพอร์ซเลนและโลหะ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างตำแหน่งจุดสัมผัส โดยจุดสัมผัสยิ่งห่างจากรอยต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนยิ่งลดลง

**Marker et al. (72)** ศึกษาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องในฟันหลังที่มีการออกแบบต่างกัน 3 แบบ ในโลหะผสมต่างกัน 2 ชนิด คือ โลหะมีค่า (precious alloy ; Olympia) และโลหะไม่มีค่า 2 ชนิด (non precious alloy ; Rexillium III & Talladium) พบว่าครอบฟันชนิดที่พอร์ซเลนขยายไปถึงปุ่มฟันด้านแก้มที่สร้างจาก Talladium มีค่าความต้านทานต่อการแตกหักมากที่สุด ส่วนครอบฟันที่มีพอร์ซเลนคลุมทั้งซี่ที่สร้างจาก Olympia มีค่าน้อยที่สุด โดยพบว่าโลหะต่างชนิดกันค่าที่ได้จะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การออกแบบที่ต่างกันค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน

**Lund และ Barber (69)** ทำการศึกษาความแข็งแรงของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (Au-Pd alloy) ในฟันกรามน้อยล่างซี่ที่สองซึ่งมีการออกแบบต่างกัน พบว่าแบบที่มีพอร์ซเลนเฉพาะด้านหน้าแต่ด้านบดเคี้ยวเป็นโลหะทั้งหมด (facial window) มีความแข็งแรงมากกว่าแบบอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่แบบที่ด้านหน้าและครึ่งหนึ่งของปุ่มฟันด้านแก้มเป็นพอร์ซเลนส่วนที่เหลือเป็นโลหะ (facial veneer) แบบที่ด้านหน้าจนถึงร่องกลางฟันเป็นพอร์ซเลนส่วนที่เหลือเป็นโลหะ (half porcelain) และแบบที่ด้านหน้าและด้านบดเคี้ยวเป็นพอร์ซเลน (complete porcelain) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

**O'Boyle et al. (80)** ได้ทำการศึกษาโครงโลหะของงานโลหะเคลือบกระเบื้อง (Ni-Cr-Mo base metal) ในฟันตัดหน้าบนซี่กลางที่มีการออกแบบขอบด้านหน้าต่างกัน พบว่าการรันโลหะรองรับขึ้นไปทางปลายฟันสามารถเพิ่มการส่องผ่านของแสงได้จริง โดยรันโครงโลหะขึ้นไป 1 มม. จะมีการส่องผ่านของแสงได้มากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนความต้านทานต่อการแตกหักไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการออกแบบที่รันโลหะขึ้นไป 0.0 มม. และ 1.0 มม. และทั้ง 2 กลุ่มนี้มีความแข็งแรงมากกว่ารันขึ้นไป 3.0 มม.

**Gardner et al. (3)** ศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนบนครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (Ni-Cr alloy) ในฟันเขี้ยวที่มีการออกแบบขอบด้านหน้าต่างกันระหว่างขอบโลหะที่มีแถบคาด 0.4 มม. กับชนิดขอบพอร์ซเลน จากการทดลองพบว่ากลุ่มที่มีขอบพอร์ซเลนจะมีค่าแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักมากกว่าขอบโลหะอย่าง

มีนัยสำคัญ แต่ค่าที่ได้ของขอบพอร์ซเลนจะมีความแปรปรวน (variation) มากกว่า อาจเนื่องมาจากความแตกต่างกันของการอัดของพอร์ซเลนที่บริเวณขอบ

**Ulusoy และ Toksavul (81)** ได้ทำการศึกษาในโครงโลหะของงานโลหะเคลือบกระเบื้องในฟันตัดหน้าบน ที่มีการออกแบบขอบด้านหน้าแตกต่างกัน คือ ชนิดที่มีขอบเป็นโลหะ และชนิดที่เป็นขอบพอร์ซเลนที่มีการรันโครงโลหะ (metal reduction) ขึ้นไป 0.0 มม. 0.5 มม. 1.0 มม. และ 1.5 มม. จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานต่อการแตกหักจะลดลงเมื่อโครงโลหะทางด้านหน้ามีการรันไปทางด้านปลายฟันมากขึ้น

**2) เกี่ยวกับความต้านทานต่อการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วนหรือเรซินคอมโพสิตเสริมความแข็งแรง (reinforced resin composite) เปรียบเทียบกับครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง**

**Miller (38)** ทำการศึกษาแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักระหว่างครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องและครอบฟันเซรามิกล้วน 3 ชนิด คือ อลูมินัสพอร์ซเลน (aluminous porcelain) ไดคอร์/อลูมินัสพอร์ซเลน (Dicor/Al porcelain) และไดคอร์ (Dicor) ในฟันตัดซี่กลางบน พบว่าครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องมีความต้านทานการแตกหักมากกว่าครอบฟันเซรามิกอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มของครอบฟันเซรามิกแต่ละชนิด

**Probster (82)** ทดสอบความแข็งแรงต่อแรงอัดของครอบฟันเซรามิกล้วน 3 ชนิด คือ อินซีแรม (InCeram) ชนิด paint-on IPS Empress และ layered IPS Empress เปรียบเทียบกับครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (Ni-Cr alloy) ในฟันตัดซี่กลางบน จากการทดลองพบว่าครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องมีความต้านทานการแตกหักมากกว่าครอบฟันเซรามิกอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มของครอบฟันเซรามิกแต่ละชนิด

**Castellani (83)** เปรียบเทียบความต้านทานการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วน 3 ชนิด คือ ไฮซีแรม (High-Ceram) ไดคอร์ และอินซีแรม เปรียบเทียบกับครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (Au-Pd alloy) พบว่าอินซีแรมมีค่าความต้านทานการแตกหักมากกว่าไดคอร์และไฮซีแรมอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง

**Strub และ Beschmidt (84)** ทดสอบค่าความต้านทานต่อการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วน 5 ชนิด คืออินซีแรม เอ็มเพรสที่ใช้เทคนิคการแต่งสี (Empress staining technique) เอ็มเพรสที่ใช้เทคนิคการทำเป็นชั้น (Empress veneering technique) ระบบซีเล็คเฟลด์สปาทิก (Celay feldspathic system) และระบบซีเล็คอินซีแรม (Celay In-Ceram system) เปรียบเทียบกับครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องทั้งก่อนและหลังการได้รับ cyclic preloading ในแบบจำลองของช่องปาก (artificial mouth) พบว่าการเลียนแบบการบดเคี้ยวและการได้รับเทอร์โมไซคลิ่ง (thermocycling) จะลดค่าความต้านทานต่อการแตกหักของพอร์ซเลนลงอย่างมากในครอบฟันทุกๆกลุ่ม แต่ไม่มี



ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างครอบฟันเซรามิกล้วนทุกกลุ่มและครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง

**Ku et al. (5)** ทำการเปรียบเทียบแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักระหว่างครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (Ni-Cr alloy) และครอบฟันเซโรเมอร์ (ceromer crowns) 3 ชนิด คือ อาร์ทกลาส (Artglass) สคัลป์เตอร์ (Sculpture) และทาร์จิส (Targis) ในฟันตัดซี่กลางบน พบว่าครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องมีความต้านทานการแตกหักมากกว่าครอบฟันเซโรเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มของครอบฟันเซโรเมอร์แต่ละชนิด

### 3) เกี่ยวกับการแตกหักของครอบฟันชนิดยึดแน่นบนฟันหลักรากฟันเทียม

**Erneklint et al. (85)** เปรียบเทียบแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนของครอบฟันเซรามิกล้วน 3 ชนิด [ออลซีแรม (AllCeram) อินซีแรม และเอ็มเพรส] ครอบฟัน gold-foil-reinforced porcelain และครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง ที่ยึดบนฟันหลักรากฟันเทียม (Astra Tech Single-tooth implant) พบว่าครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องมีความต้านทานการแตกหักมากกว่าครอบฟันเซรามิกอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในกลุ่มของครอบฟันเซรามิกแต่ละชนิด

**Yildirim et al. (86)** ศึกษาค่าความต้านทานต่อการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วน (IPS Empress) ที่ยึดบนฟันหลักรากฟันเทียม 2 ชนิด คือ อลูมินัมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ ( $ZrO_2$ ) พบว่าแรงที่ใช้ในการแตกหักของฟันหลักรากฟันเทียมชนิดเซอร์โคเนียมออกไซด์ มีค่ามากกว่าอลูมินาออกไซด์ถึง 2 เท่าอย่างมีนัยสำคัญ

**Torrado et al. (87)** เปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อการแตกหักของพอร์ซเลนของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง (Pd-Ga alloy) ในฟันกรามน้อยชนิดยึดแน่นบนฟันหลักรากฟันเทียมด้วยสกรูและซีเมนต์ที่มีหน้าสบฟัน (occlusal table) และมีตำแหน่งของรูเปิดสกรูต่างกัน พบว่าครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องชนิดยึดแน่นบนฟันหลักรากฟันเทียมด้วยสกรูมีค่าความต้านทานต่อการแตกหักน้อยกว่าชนิดซีเมนต์ และความกว้างของหน้าสบฟันของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องชนิดยึดแน่นด้วยซีเมนต์และตำแหน่งรูเปิดของสกรู ไม่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการแตกหักของพอร์ซเลน

**Scherrer และ de Rijk (88)** ทดสอบค่าความต้านทานต่อการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วนที่มีความยาวของครอบฟันต่างกัน 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเฉพาะด้านบดเคี้ยว (occlusal cover) และครอบฟันทั้งซี่ (complete crown) ซึ่งรองรับด้วยแม่แบบเรซิน (resin die) ที่มีค่ามอดุลัสแห่งความยืดหยุ่นต่างกัน พบว่าค่าของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีค่ามอดุลัสแห่งความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มที่คลุมเฉพาะด้านบดเคี้ยว นอกจากนี้ในกลุ่มที่มีค่ามอดุลัส

แห่งความยืดหยุ่นน้อยที่สุด กลุ่มที่เป็นครอบฟันทั้งซึ่งจะมีค่ามากกว่ากลุ่มที่คลุมเฉพาะด้านบดเคี้ยวถึง 2 เท่า ขณะที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างทั้งสองกลุ่มเมื่อรองรับด้วยแม่แบบที่มีค่ามอดุลัสแห่งความยืดหยุ่นมากที่สุด

### การศึกษาที่เกี่ยวกับการแตกหักของเซรามิกล้วนที่มีความหนาหรืออัตราส่วนของแกนและวีเนียร์พอร์ซเลนแตกต่างกัน มีดังต่อไปนี้คือ

**Webber et al. (89)** เปรียบเทียบขนาดของแรงกดอัดที่ทำให้เกิดการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วนที่มีความหนาของแกนต่อวีเนียร์พอร์ซเลน (core:veneer porcelain) และมีการกรอดค้ำด้านฟันตามแกน (axial reduction) ต่างกัน ในครอบฟันโพรซีราและครอบฟันอินซีเรมจำนวน 3 กลุ่ม จากการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของทั้ง 3 กลุ่ม และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อการกรอดค้ำด้านฟันตามแกนของแรงกดอัดที่ทำให้เกิดการแตกหักของครอบฟันโพรซีรา

**Harrington et al. (90)** เปรียบเทียบขนาดของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของครอบฟันเซรามิกล้วนที่มีความหนาของวีเนียร์พอร์ซเลนด้านบดเคี้ยว (occlusal veneer porcelain) ต่างกัน ในครอบฟันโพรซีรา 4 กลุ่ม และครอบฟันอินซีเรมอีกหนึ่งกลุ่ม พบว่าการเพิ่มความหนาของวีเนียร์พอร์ซเลนด้านบดเคี้ยว จะเพิ่มแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของครอบฟันโพรซีราออซีเรม (Procera AllCeram) แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักระหว่างครอบฟันโพรซีราและอินซีเรม

**Tsai et al. (91)** ศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของกลาสเซรามิกต่อกลไกการแตกหักแบบเฮทซ์เซนและแบบเป็นก้อนขนาดใหญ่ (Hertzian and bulk mechanism) ของไดคอร์แผ่นกลม (Dicor glass disk) ที่มีความหนาต่างกันคือ 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0, และ 2.4 มม. ยึดอยู่บนแผ่นกลมอีพอกซีเรซิน (epoxy resin disk) ด้วยเรซินซีเมนต์ชนิดแข็งตัวด้วยแสง (Dicor light-activated resin cement) จากการทดลองพบว่าการเกิดรอยร้าว (crack formation) ขึ้น 2 ชั้นตอนระหว่างที่ได้รับแรง และแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของกลุ่มที่มีความหนา 1.6, 2.0 และ 2.4 มม. มีค่ามากกว่ากลุ่มที่เหลืออื่นๆอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลนต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง โดยมีประชากรเป้าหมายและประชากรตัวอย่าง เกณฑ์ในการคัดเข้า เกณฑ์ในการคัดออก สิ่งแทรกแซง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและวิธีการทดลอง ดังต่อไปนี้

#### ประชากรเป้าหมายและประชากรตัวอย่าง

##### ประชากรเป้าหมาย (Target population)

ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่สร้างจากกลุ่มโลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นพื้นฐาน ซึ่งถือว่าเป็นกลุ่มโลหะของการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีการใช้มากในประเทศไทย

##### ประชากรตัวอย่าง

ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่สร้างจากโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม (4all<sup>®</sup>, Williams, Ivoclar Vivadent Inc, Amherst, USA) ซึ่งอยู่ในกลุ่มโลหะผสมที่มีนิกเกิลเป็นพื้นฐานร่วมกับพอร์ซเลน (IPS d.SIGN<sup>®</sup>, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Lichtenstein) ที่บริษัทผู้ผลิตแนะนำให้ใช้คู่กัน โดยเตรียมให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7 มม. x 9 มม. ที่มีความหนาของโลหะและพอร์ซเลนต่างกัน

##### เกณฑ์ในการคัดเข้า

ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีความหนาตามกำหนด ที่ไม่มีรอยร้าวในชิ้นงาน หลังจากเตรียมชิ้นงานเสร็จและหลังจากที่ยึดชิ้นงานกับแป้นทองเหลือง เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอกำลังขยาย 15 เท่า

##### เกณฑ์ในการคัดออก

ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีความหนาไม่ตรงตามกำหนด รวมถึงชิ้นงานที่มีรอยร้าวเกิดขึ้นหลังจากเตรียมชิ้นงานเสร็จและหลังจากที่ยึดชิ้นงานกับแป้นทองเหลือง เมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอกำลังขยาย 15 เท่า

## สิ่งแทรกแซง

การวิจัยนี้เพื่อศึกษาค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

**ส่วนที่ 1** กลุ่มชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาของโลหะคงที่ 0.30 ม.ม. แต่มีความหนาของพอร์ซเลนต่างกัน 5 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 พอร์ซเลนหนา 0.70 ม.ม.

กลุ่มที่ 2 พอร์ซเลนหนา 1.35 ม.ม.

กลุ่มที่ 3 พอร์ซเลนหนา 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 4 พอร์ซเลนหนา 2.65 ม.ม.

กลุ่มที่ 5 พอร์ซเลนหนา 3.30 ม.ม.

**ส่วนที่ 2** กลุ่มชิ้นงานตัวอย่างที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.00 ม.ม. แต่มีความหนาของโลหะต่างกัน 7 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 6 โลหะหนา 0.10 ม.ม.

กลุ่มที่ 7 โลหะหนา 0.20 ม.ม.

กลุ่มที่ 3 โลหะหนา 0.30 ม.ม.

กลุ่มที่ 8 โลหะหนา 0.40 ม.ม.

กลุ่มที่ 9 โลหะหนา 0.70 ม.ม.

กลุ่มที่ 10 โลหะหนา 1.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 11 โลหะหนา 1.30 ม.ม.

## เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

### อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องทดสอบสากล (Instron universal testing machine) รุ่น Instron 8872 และ หัวกดหน้าตัดทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ม.ม. (stainless steel stylus with round end carbide pin)
2. เครื่องทดสอบความแข็งของวัสดุ (durometer) รุ่น Instrument, Pacific Transducer Corp., USA) ตูมน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม
3. กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (stereomicroscope) รุ่น ANTI-FUNJI MEJI Techno Co., LTD, Japan)

4. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (incubator) รุ่น Contherm, series five
5. เครื่องทำความสะอาดความถี่เหนือเสียง (ultrasonic cleanser; Branson 5210)
6. เครื่องวัดความหนาไมโครมิเตอร์ (micrometer)
7. เครื่องเป่าทราย (sandblast) รุ่น Miniblaster™, Israel
8. แป้นทองเหลืองสำหรับทดสอบ
9. แผ่นเหล็กสำหรับทำแบบขึ้นรูป (metal mold)
10. เครื่องมือสำหรับขัดชิ้นงานซึ่งประดิษฐ์ขึ้นจากแท่งพลาสติกและเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง (Formatray)
11. นาฬิกาจับเวลา
12. สป้อน (spoon)
13. เอกซ์พลอเรอร์ (explorer)
14. แผ่นกระจก (glass slab) และพายผสมซีเมนต์ (cement spatula)

#### วัสดุที่ใช้

1. โลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-โมลลิบดีนัม (4all<sup>®</sup>, Williams, Ivoclar Vivadent Inc, Amherst, USA)
2. พอร์ซเลน (IPS d.SIGN<sup>®</sup>, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)
3. อะคริลิกเรซินชนิดบ่มด้วยตัวเอง (autopolymerizing acrylic resin; Duralay, Dental Mfg. Co., USA)
4. กระดาษทรายน้ำเบอร์ 150, 180, 240, 280, 320, 500, 600, 800, 1000 และ 1200
5. สารแขวนลอยกากเพชร (premium diamond suspension) ขนาดอนุภาค 9 และ 3 ไมครอน (Leco<sup>®</sup> corporation)
6. ฟ้าย้อมหยาบ
7. ผงอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide powder : Hi-Aluminus, Shofu Inc., Japan) ขนาด 50 ไมครอน
8. ซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ (HY-Bond Zinc Phosphate Cement<sup>®</sup>, Shofu InC., Japan)
9. กระดาษกาวสองหน้าชนิดบาง
10. ปลอกนี้วยางสำหรับขัดชิ้นงาน
11. น้ำกลั่น
12. อัลกอฮอล์
13. ฟ้าย้อม

## วิธีการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการทดสอบแรงอัดของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7 ม.ม. x 9 ม.ม. ซึ่งมีขนาดเท่ากับค่าเฉลี่ยของด้านบดเคี้ยวของฟันกรามน้อยบนที่มีความหนาต่างๆ กันจำนวน 11 กลุ่ม กลุ่มละ 10 ชิ้น (ตารางที่ 6) เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของฟอร์ชเลนบนชิ้นงานตัวอย่าง ด้วยเครื่องทดสอบสากล (Instron universal testing machine, Instron 8872)

ตารางที่ 6 แสดงกลุ่มตัวอย่างที่มีความหนาของโครงโลหะและฟอร์ชเลนต่างกัน

กลุ่มที่	ความหนาของโลหะ	ความหนาของฟอร์ชเลน	ความหนารวม	จำนวน (ชิ้น)
1	0.30 ม.ม.	0.70 ม.ม.	1.00 ม.ม.	10
2	0.30 ม.ม.	1.35 ม.ม.	1.65 ม.ม.	10
3	0.30 ม.ม.	2.00 ม.ม.	2.30 ม.ม.	10
4	0.30 ม.ม.	2.65 ม.ม.	2.95 ม.ม.	10
5	0.30 ม.ม.	3.30 ม.ม.	3.60 ม.ม.	10
6	0.10 ม.ม.	2.00 ม.ม.	2.10 ม.ม.	10
7	0.20 ม.ม.	2.00 ม.ม.	2.20 ม.ม.	10
8	0.40 ม.ม.	2.00 ม.ม.	2.40 ม.ม.	10
9	0.70 ม.ม.	2.00 ม.ม.	2.70 ม.ม.	10
10	1.00 ม.ม.	2.00 ม.ม.	3.00 ม.ม.	10
11	1.30 ม.ม.	2.00 ม.ม.	3.30 ม.ม.	10

## การเตรียมชิ้นตัวอย่าง

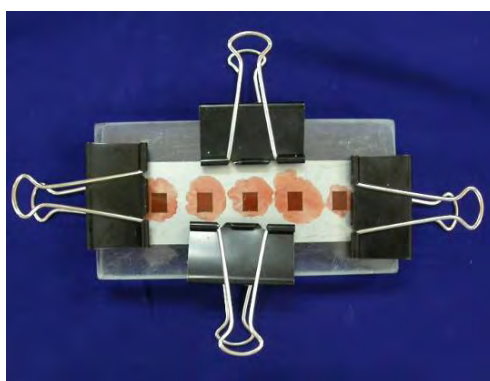
### 1. การเตรียมโครงโลหะ

ทำการเตรียมชิ้นตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 7 ม.ม. x 9 ม.ม. ที่มีความหนาต่างๆกัน จากอะคริลิกเรซินชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง (autopolymerizing acrylic resin ; Duralay, Dental Mfg. Co., USA) ร่วมกับแผ่นเหล็กสำหรับทำแบบ (metal mold) ขนาด 7 ม.ม. x 9 ม.ม. ที่มีความหนามากกว่าความหนาของโลหะที่ต้องการประมาณ 0.3-0.4 ม.ม. (ภาพที่ 3, 4) จากนั้นนำมาขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 240 ให้มีความหนาที่สม่ำเสมอและหนากว่าความหนาของโลหะที่ต้องการ 0.2 ม.ม. จากนั้นนำแบบหล่อดูราเลย์ที่ได้ไปยึดกับขี้ผึ้งแกนค้ำรูปเท (sprue wax) (ภาพที่ 5) ลงอินเวสท์เมนต์ และผ่านกระบวนการหล่อตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต เพื่อให้ได้ชิ้นงานโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม- โมลิบดีนัม (4all<sup>®</sup>, Williams, Ivoclar Vivadent Inc, Amherst, USA)

จากนั้นนำชิ้นโลหะที่ได้มาขัดแต่งให้ได้ขนาดตามที่ต้องการด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150, 180 ตามด้วยเบอร์ 250 เพื่อให้มีความหนาที่สม่ำเสมอตามความหนาของโลหะที่ต้องการ (ความคลาดเคลื่อนของความหนาที่เกิดขึ้น  $\pm 0.01$  มม.) (ภาพที่ 6) โดยวัดความหนาของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ (ภาพที่ 7) ทำการเตรียมพื้นผิว (surface treatment) โลหะตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต โดยการเป่าทรายด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide powder; Hi-Aluminus, Shofu Inc., Japan) ขนาดอนุภาค 110 ไมครอน (ภาพที่ 8) ตามด้วยการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยไอน้ำ (steam cleaner; MINI STEAM JET, TISI) (ภาพที่ 9) จากนั้นนำไปเข้าเตาเผา (ภาพที่ 10) เพื่อให้เกิดออกไซด์ที่ผิวโลหะ (oxidizing)



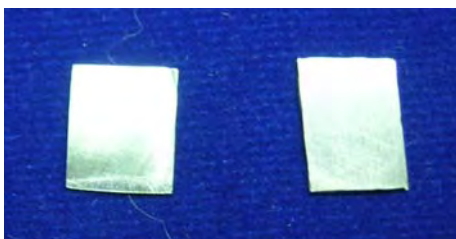
ภาพที่ 3 แสดงแผ่นเหล็กสำหรับทำแบบขึ้นรูป



ภาพที่ 4 แสดงการเตรียมแบบหล่อดูราเลย์



ภาพที่ 5 แสดงการยึดแบบหล่อดูราเลย์กับซีพิ้งแกนค้ำรูเท (sprue wax)



ภาพที่ 6 แสดงชิ้นโลหะที่ขัดแต่งจนได้ความหนาที่ต้องการ



ภาพที่ 7 แสดงเครื่องวัดความหนาไมโครมิเตอร์



ภาพที่ 8 แสดงเครื่องเป่าทราย

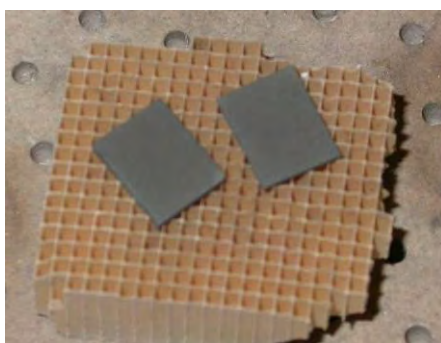


ภาพที่ 9 แสดงเครื่องทำความสะอาดพื้นผิวด้วยไอน้ำ (steam cleaner)





ภาพที่ 10 แสดงเตาเผาโครงโลหะเพื่อสร้างชั้นออกไซด์



ภาพที่ 11 แสดงชิ้นงานที่ทำการเตรียมพื้นผิวโลหะก่อนทำการขึ้นรูปวีเนียร์พอร์ซเลน

## 2. การเตรียมวีเนียร์พอร์ซเลน

นำโลหะที่เตรียมเสร็จ (ภาพที่ 11) ไปขึ้นรูปวีเนียร์พอร์ซเลน (IPS d.SIGN<sup>®</sup>, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein) และนำไปเข้าเตาเผาพอร์ซเลน (porcelain furnace; Programat P80 Ivoclar) (ภาพที่ 12) ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ให้มีความหนามากกว่าที่กำหนด 0.2 มม. จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาขัดด้านที่พอกพอร์ซเลนทับด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 500, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามด้วยสารแขวนลอยกากเพชร (premium diamond suspension; Leco<sup>®</sup> corporation) ขนาดอนุภาค 9 ไมครอน และ 3 ไมครอน รวมกับผ้ากำมะหยี่ เพื่อให้มีความหนาที่สม่ำเสมอตามความหนาของชิ้นงานที่ต้องการ (ความคลาดเคลื่อนของความหนาที่เกิดขึ้น  $\pm 0.01$  มม.) โดยวัดความหนาของชิ้นงานด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ จากนั้นทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่เหนือเสียง (ultrasonic cleanser; Branson 5210) (ภาพที่ 13) รวมกับน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำให้แห้ง นำชิ้นงานที่ได้ไปเคลือบผิว (glazing) (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 12 แสดงเตาเผาพอร์ซเลน



ภาพที่ 13 แสดงการทำความสะดวกขึ้นงานด้วยเครื่องทำความสะดวกความถี่เหนือเสียง



ภาพที่ 14 แสดงชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่ทำการเคลือบผิวแล้ว

### การทดสอบหาค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน

ก่อนที่จะทำการทดสอบนำชิ้นงานที่ได้มาตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ

(stereomicroscope; ANTI-FUNJI MEJI Techno Co., LTD, Japan) (ภาพที่ 15) กำลังขยาย 15 เท่า ว่ามีรอยร้าวในชิ้นงานหรือไม่ ถ้ามีให้คัดออกไปถ้าไม่มีให้นำชิ้นงานที่ได้มาเตรียมพื้นผิวโลหะโดยการเป่าทรายด้วยผงอลูมิเนียมออกไซด์ (aluminum oxide powder; Hi-Aluminus, Shofu Inc., Japan) ขนาดอนุภาค 50 ไมครอน (sandblast; Miniblaster™, Israel) (ภาพที่ 16) จากนั้นนำชิ้นงานมาทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดความถี่เหนือเสียง (ultrasonic cleanser; Branson 5210) รวมกับน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำให้แห้ง นำชิ้นงานที่เตรียมพื้นผิวเสร็จไปยึดที่ตรงกลางของแป้นทองเหลืองขนาด 30 x 30 มม.<sup>2</sup> สูง 10 มม. ที่ทำการเป่าทรายเตรียมไว้ ด้วยซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ (HY-Bond Zinc Phosphate Cement® , Shofu InC., Japan) โดยใช้แรงกดจากนิ้วมือ ตามด้วยแรงในแนวตั้งซึ่งมีค่าคงที่ (vertical static load) ทันที ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งวัสดุที่มีตุ้มน้ำหนักขนาด 5 กิโลกรัม (durometer; Instrument, Pacific Transducer Corp., USA) เป็นเวลา 10 นาที (ภาพที่ 17) กำจัดซีเมนต์ส่วนเกินออก (ภาพที่ 18) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (stereomicroscope; ANTI-FUNJI MEJI Techno Co., LTD, Japan) กำลังขยาย 15 เท่าอีกครั้งว่ามีรอยร้าวหรือไม่ ถ้ามีให้คัดออกไปถ้าไม่มีให้นำชิ้นงานที่ยึดอยู่บนแป้นทองเหลืองไปแช่ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง ที่ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (89, 90)



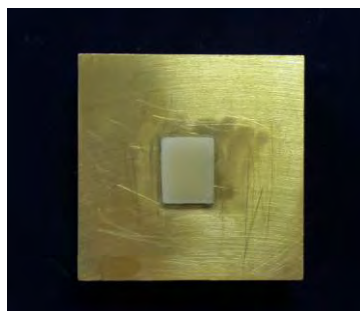
ภาพที่ 15 แสดงกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ



ภาพที่ 16 แสดงเครื่องเป่าทราย

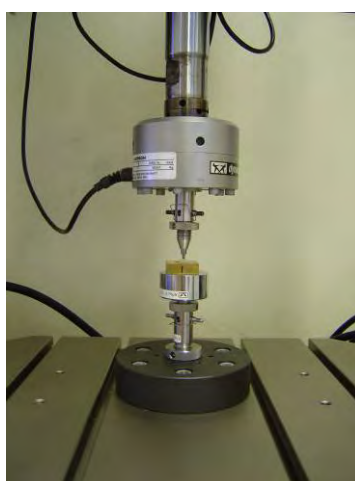


ภาพที่ 17 แสดงการยืดชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงวัสดุที่มีค้ำน้ำหนัก 5 กิโลกรัม



ภาพที่ 18 แสดงชิ้นงานที่ยึดอยู่บนแป้นทองเหลือง

นำชิ้นงานที่ยึดอยู่บนแป้นทองเหลืองมาทดสอบแรงอัดในแนวตั้ง (vertical compressive load) ด้วยเครื่องทดสอบสากล (Instron Universal testing machine; Instron 8872) (ภาพที่ 19) ซึ่งมีหัวกดหน้าตัดทรงกลม ทำจากโลหะสเตนเลสสตีลและส่วนปลายแท่งหัวกดทำจากโลหะคาร์ไบด์ (stainless steel stylus with round end carbide pin) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. (87) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางชิ้นงานด้วยความเร็วหัวกด 1 มม./นาที (80, 81) จนแตก ทำการบันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ชเลนแตก



ภาพที่ 19 แสดงการทดสอบแรงอัดในแนวตั้งด้วยเครื่องทดสอบสากล (Instron Universal testing machine)

### การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการบันทึกค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ชเลนแตก และกราฟที่ได้ระหว่างทำการทดลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบสากล (Instron Universal testing machine; Instron 8872 )

### การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) โดยใช้โปรแกรมเอสพีเอสเอส รุ่นที่ 13 (SPSS version 13.0) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาผลของความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลน ที่มีต่อแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักของชิ้นงาน โลหะเคลือบกระเบื้อง ซึ่งยึดอยู่บนเป็นทองเหลือง โดยใช้แรงอัดในแนวตั้งที่กึ่งกลางชิ้นงาน หัวกดรูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ความเร็วหัวกด 1 มม./นาที่ จนแตก แสดงได้เป็น 2 ตอน คือ 1) ข้อมูลดิบ และการวิเคราะห์ผลทางสถิติจากข้อมูลดิบ และ 2) ลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลอง

#### ตอนที่ 1 ข้อมูลดิบและการวิเคราะห์ผลทางสถิติจากข้อมูลดิบ

จากการทดสอบแรงอัดสูงสุดในแนวตั้งที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักบนชิ้นงานที่มีความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลน ได้ค่าแรงอัดสูงสุดของแต่ละชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 7

ผลจากการทดลองที่ได้จะแยกออกเป็น 2 ส่วน เพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติ 2 ข้อ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ดังนี้

1. ผลของความผันแปรของความหนาของพอร์ซเลนที่มีความหนาของโลหะคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงาน โลหะเคลือบกระเบื้อง ประกอบด้วยกลุ่มที่ 1-5

2. ผลของความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงาน โลหะเคลือบกระเบื้อง ประกอบด้วยกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11

## 1.ผลของความผันแปรของความหนาของพอร์ซเลนที่มีความหนาของโลหะคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง

นำข้อมูลดิบของกลุ่มที่ 1-5 มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ซึ่งต้องทำการทดสอบเงื่อนไขก่อน 2 ข้อ คือ ตัวอย่างของประชากรต้องมีการแจกแจงปกติและค่าความแปรปรวนของประชากรต้องเหมือนกัน ทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (One-sample Kolmogorov-Smirnov) พบว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (ภาคผนวกตาราง ข) จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลวีเน (Levene's Test) พบว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลกลุ่มที่ 1-5 ไม่แตกต่างกัน (ภาคผนวกตาราง ข) ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขทั้ง 2 ข้อ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ได้ ซึ่งทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าจะยอมรับสมมติฐานว่าง (null hypothesis) ของการศึกษานี้ ( $p=0.291$ ) (ภาคผนวกตาราง ฉ) [นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust Test) ชนิด บราวน์-ฟอร์ซไธต์ (Brown-Forsythe) ซึ่งใช้ในกรณีที่ไม่มีเงื่อนไขเกี่ยวกับความเหมือนกันของค่าความแปรปรวน (ภาคผนวกตาราง ฉ) ด้วย พบว่าผลที่ได้ก็ออกมาเช่นเดียวกัน ( $p=0.298$ )] แสดงว่าความผันแปรของความหนาของพอร์ซเลนไม่มีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง หรือชิ้นงานที่มีโลหะหนา 0.3 มม. แต่มีความหนาของพอร์ซเลนต่างกันทั้ง 5 กลุ่ม คือ 0.7 มม. 1.35 มม. 2.0 มม. 2.65 มม. และ 3.3 มม. มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p = 0.291$ ) ที่อำนาจการทดสอบทางสถิติ (power of the statistical test;  $1-\beta$ ) ตั้งแต่ 0.051-0.573 ที่คำนวณได้จาก PS power and sample size program (Version 2.1.30) (92) ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักของชิ้นงานกลุ่มที่ 1-5 แสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 20 ซึ่งจะเห็นว่ากลุ่มที่มีพอร์ซเลนหนา 1.35 มม. (กลุ่มที่ 2) มีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้ พอร์ซเลนแตกหักสูงสุดที่สุด คือ 2644.93 นิวตัน ซึ่งมากกว่ากลุ่มที่พอร์ซเลนหนา 2.00 มม. (กลุ่มที่ 3) 2.65 มม. (กลุ่มที่ 4) และ 0.70 มม. (กลุ่มที่ 1) ซึ่งใช้แรงอัด 2629.19 นิวตัน 2436.32 นิวตัน และ 2396.23 นิวตัน ตามลำดับ และกลุ่มที่มีพอร์ซเลนหนา 3.30 มม. ใช้แรงอัดในการทำให้พอร์ซเลนแตกหักต่ำสุด คือ 2352.82 นิวตัน

ตารางที่ 7 แสดงข้อมูลดิบ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ

ชั้น	← โลหะหนาคงที่ 0.3 ม.ม. →					← พอร์ซเลนหนาคงที่ 2.0 ม.ม. →					
	กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	กลุ่ม 4	กลุ่ม 5	กลุ่ม 3	กลุ่ม 6	กลุ่ม 7	กลุ่ม 8	กลุ่ม 9	กลุ่ม 10	กลุ่ม 11
1	2799.54	2424.41	2037.92	2823.15	2550.22	650.45	1999.31	2797.25	2575.30	2048.12	3048.02
2	2472.46	2129.07	2450.65	2174.93	3001.08	172.17	2299.12	2522.92	2648.37	2399.72	2271.68
3	2174.73	2977.92	2101.08	2276.33	2936.80	1099.5	1151.15	2748.01	2974.57	2172.57	2725.58
4	2372.37	3148.81	2823.44	2405.95	2499.96	1925.82	2273.30	2523.79	3249.43	2824.83	3126.37
5	2575.90	2676.75	2748.34	2124.46	2701.23	2225.72	2851.13	2198.84	2550.92	2297.79	2772.05
6	3002.18	2825.17	2525.69	2598.97	2200.12	2075.67	2474.92	2790.86	2374.79	2355.53	2374.22
7	2946.61	3028.86	2650.10	2125.08	2501.73	1930.41	1949.75	2624.26	2773.21	2701.05	2854.62
8	1170.37	2451.38	2772.26	2024.49	2776.83	1782.80	2499.41	2199.52	2576.15	2575.78	2372.69
9	1700.45	2731.22	2100.38	2598.98	2898.74	2002.16	2149.52	2676.10	2801.04	2499.40	2320.94
10	2747.68	2055.72	2153.35	2375.88	2225.20	1646.69	2249.48	2574.54	2698.76	2631.22	2248.01
X	2396.23	2644.93	2436.32	2352.82	2629.19	1551.14	2189.71	2565.61	2722.25	2450.60	2611.42
S.D.	580.31	373.05	312.34	257.13	282.66	682.92	448.62	217.44	247.08	242.15	333.15

เมื่อ

กลุ่มที่ 1 = โลหะ 0.30 ม.ม. พอร์ซเลน 0.70 ม.ม.

กลุ่มที่ 6 = โลหะ 0.10 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 2 = โลหะ 0.30 ม.ม. พอร์ซเลน 1.35 ม.ม.

กลุ่มที่ 7 = โลหะ 0.20 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 3 = โลหะ 0.30 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 8 = โลหะ 0.40 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 4 = โลหะ 0.30 ม.ม. พอร์ซเลน 2.65 ม.ม.

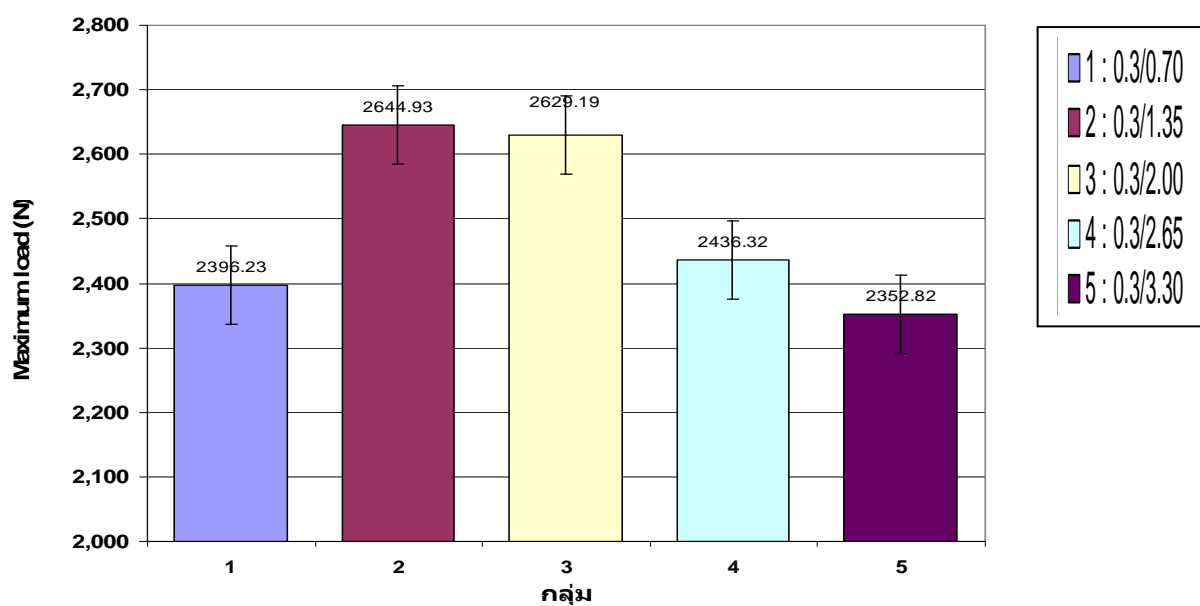
กลุ่มที่ 9 = โลหะ 0.70 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 5 = โลหะ 0.30 ม.ม. พอร์ซเลน 3.30 ม.ม.

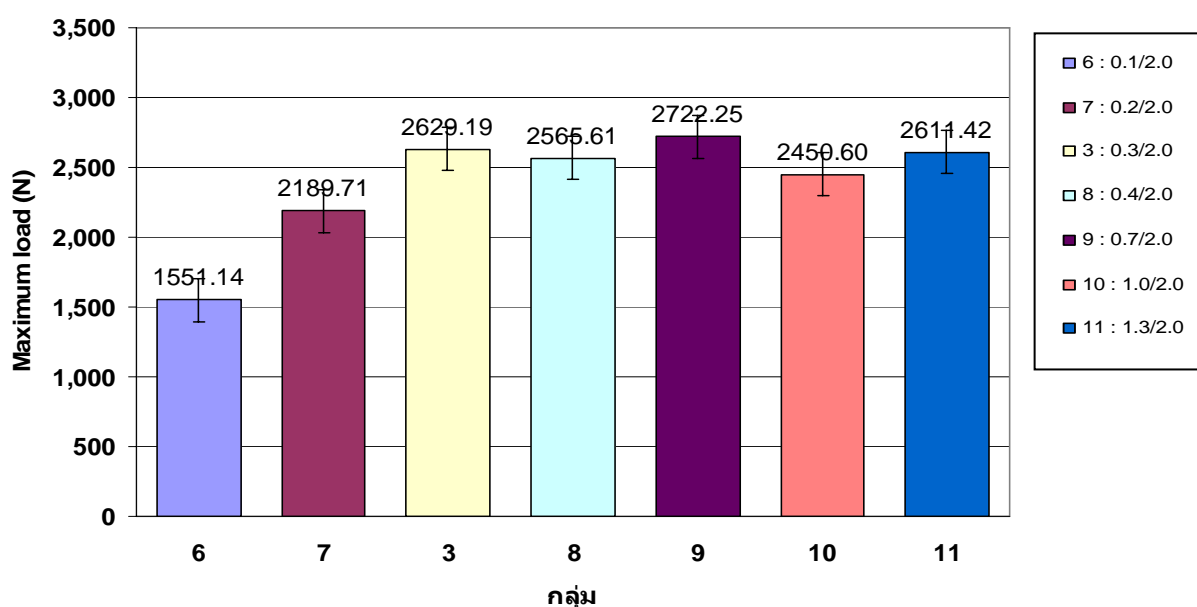
กลุ่มที่ 10 = โลหะ 1.00 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.

กลุ่มที่ 11 = โลหะ 1.30 ม.ม. พอร์ซเลน 2.00 ม.ม.





ภาพที่ 20 แผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนของกลุ่มที่ 1-5



ภาพที่ 21 แผนภูมิแสดงค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนของกลุ่มที่ 3

และกลุ่มที่ 6-11

## 2.ผลของความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ชเลนคองที่ต่อการแตกหักของพอร์ชเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง

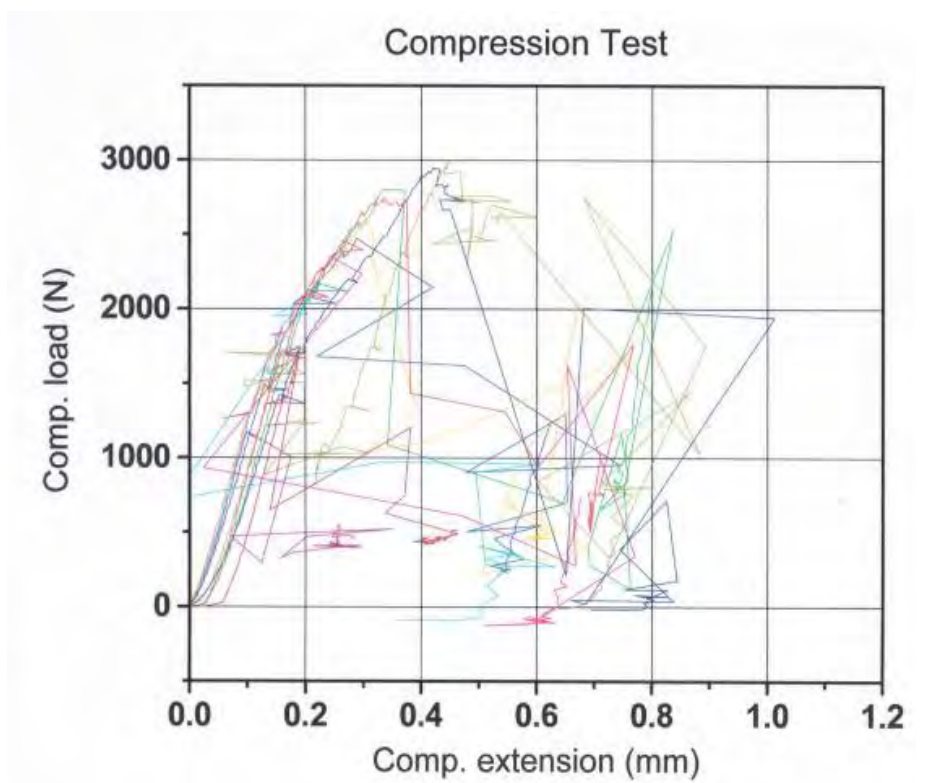
นำข้อมูลดิบของกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11 มาทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบแบบวัน-แซมเปิล โครโมโกรอฟ-สเมอนอฟ (One-sample Kolmogorov-Smirnov) พบว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (ภาคผนวกตาราง ก) จากนั้นทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลวีน (Levene's Test) พบว่าค่าความแปรปรวนของข้อมูลกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11 มีค่าไม่เหมือนกัน (ภาคผนวกตาราง ก) ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust Test) และใช้การวิเคราะห์ชไนคบราวน์-ฟอร์ซิดี้ (Brown-Forsythe) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวกตาราง ข) พบว่าจะปฏิเสธสมมติฐานว่างของการศึกษานี้ ( $p=0.000$ ) ซึ่งยืนยันผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ในกรณีที่พิจารณาว่ามีค่าความแปรปรวนเหมือนกัน (ภาคผนวกตาราง จ) ( $p=0.000$ ) ผลจากการวิเคราะห์แสดงว่าความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ชเลนคองที่มีผลต่อแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ชเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง หรือชิ้นงานที่มีความหนาของพอร์ชเลนคองที่ 2.00 ม.ม. แต่มีความหนาของโลหะแตกต่างกัน คือ 0.1 ม.ม. 0.2 ม.ม. 0.3 ม.ม. 0.4 ม.ม. 0.7 ม.ม. 1.0 ม.ม. และ 1.3 ม.ม. จะมีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ชเลนเกิดการแตกหักแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างน้อย 2 กลุ่ม ( $p=0.000$ ) ดังนั้นจึงทำการทดสอบการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (multiple comparison) ต่อโดยใช้การทดสอบแบบแทมเฮน (Tamhane's Test) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบข้อมูลที่ละคู่โดยมีพื้นฐานดั้งเดิมมาจากการเปรียบเทียบแบบที-เทสท์ (T-test) โดยยึดค่าเฉลี่ยของกลุ่มนั้นๆเป็นจุดกลางเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มที่เหลือทั้งหมด แล้วแสดงผลการเปรียบเทียบเป็นตารางซึ่งสามารถบอกได้ว่ากลุ่มนั้นมีความแตกต่างหรือไม่แตกต่างจากกลุ่มใดบ้าง โดยค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ชเลนเกิดการแตกหักของชิ้นงานกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11 แสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 21

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่มที่มีความหนาของพอร์ชเลนคองที่ 2.00 ม.ม. แต่มีความหนาของโลหะต่างกัน (ภาคผนวกตาราง ค) พบว่ากลุ่มที่มีโลหะหนา 0.10 ม.ม. (กลุ่มที่ 6) ต้องใช้แรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ชเลนเกิดการแตกหักเฉลี่ย 1551.14 นิวตัน ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดและมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) กับกลุ่มที่มีโลหะหนา 0.20 ม.ม. (กลุ่มที่ 7) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ชเลนเกิดการแตกหัก 2189.71 นิวตัน แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) กับกลุ่มที่มีโลหะหนา 1.00 ม.ม. (กลุ่มที่ 10) 0.40 ม.ม. (กลุ่มที่ 8) 1.30 ม.ม. (กลุ่มที่ 11) 0.30 ม.ม. (กลุ่มที่ 3) และ 0.70 ม.ม. (กลุ่มที่ 9)

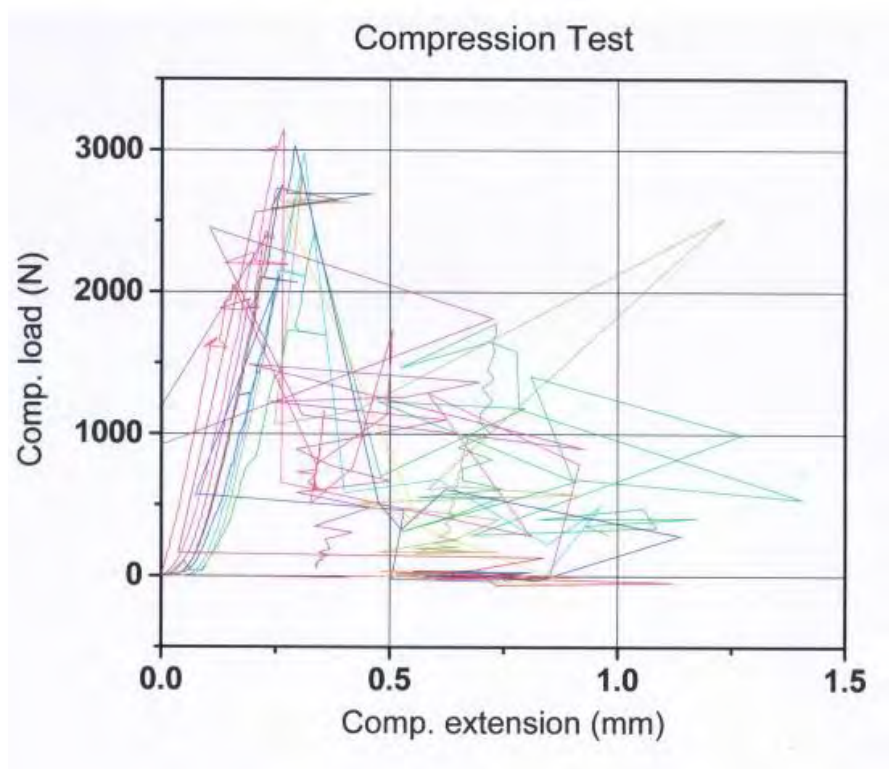
ที่มีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหัก 2450.60 นิวตัน 2565.61 นิวตัน 2611.42 นิวตัน 2629.191 นิวตัน และ 2722.25 นิวตัน ตามลำดับจากน้อยไปมาก ขณะที่กลุ่มที่มีโลหะหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) นอกจากนี้กลุ่มที่มีโลหะหนา 0.20 มม. ที่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) กับกลุ่มอื่นๆ ที่มีโลหะหนาต่างกัน

## ตอนที่ 2 ลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลอง

ลักษณะของกราฟที่บันทึกได้จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ช่วงแรกของกราฟจะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มให้แรงอัดกับชิ้นงานจนกระทั่งถึงค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงาน และกราฟช่วงหลังซึ่งเกิดขึ้นหลังจากชิ้นงานเกิดการแตกหักแล้ว จากลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ทั้ง 11 กลุ่ม พบว่า กราฟที่ได้จากกลุ่มที่ 1 จะแตกต่างจากกลุ่มอื่นๆ โดยช่วงแรกของกราฟจะเริ่มจากเส้นทแยงที่เริ่มต้นจากศูนย์แล้วขึ้นไปประมาณครึ่งหนึ่งของช่วงแรกของกราฟจากนั้นเส้นกราฟที่ได้จะค่อนข้างโค้งและมีรอยหยักไปมา ส่วนช่วงที่สองของกราฟหลังจากชิ้นงานแตกก็หยักไปมาไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งแตกต่างอย่างมากกับลักษณะของกราฟที่ได้จากกลุ่มที่ 3-11 ซึ่งส่วนใหญ่พบว่าช่วงแรกของกราฟจะเป็นเส้นทแยงที่ตรงต่อเนื่องกันไปจนถึงจุดสูงสุดของกราฟแล้วเข้าสู่ช่วงที่สองที่เป็นเส้นตรงเช่นเดียวกัน ส่วนกราฟที่ได้จากกลุ่มที่ 2 จะมีลักษณะคล้ายกับกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 3-11 โดยช่วงแรกของกราฟจะเป็นเส้นทแยงที่ค่อนข้างตรงแต่มีรอยหยักไปมาเล็กน้อยคล้ายกลุ่มที่ 3-11 แต่มากกว่า ขณะที่ช่วงที่สองของกราฟกลับมีลักษณะคล้ายกับกลุ่มที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 22

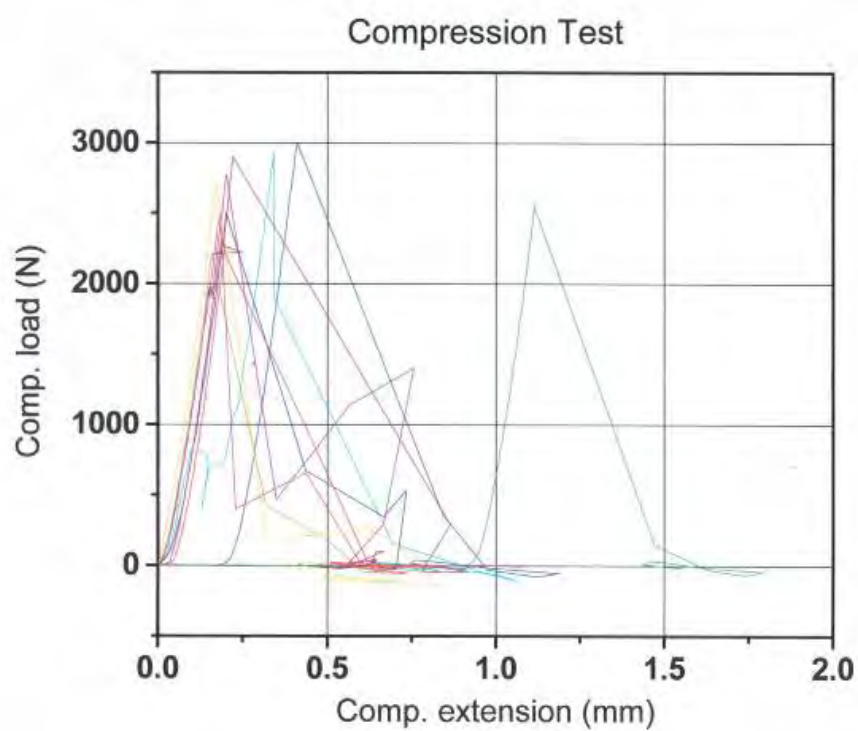


กลุ่มที่ 1

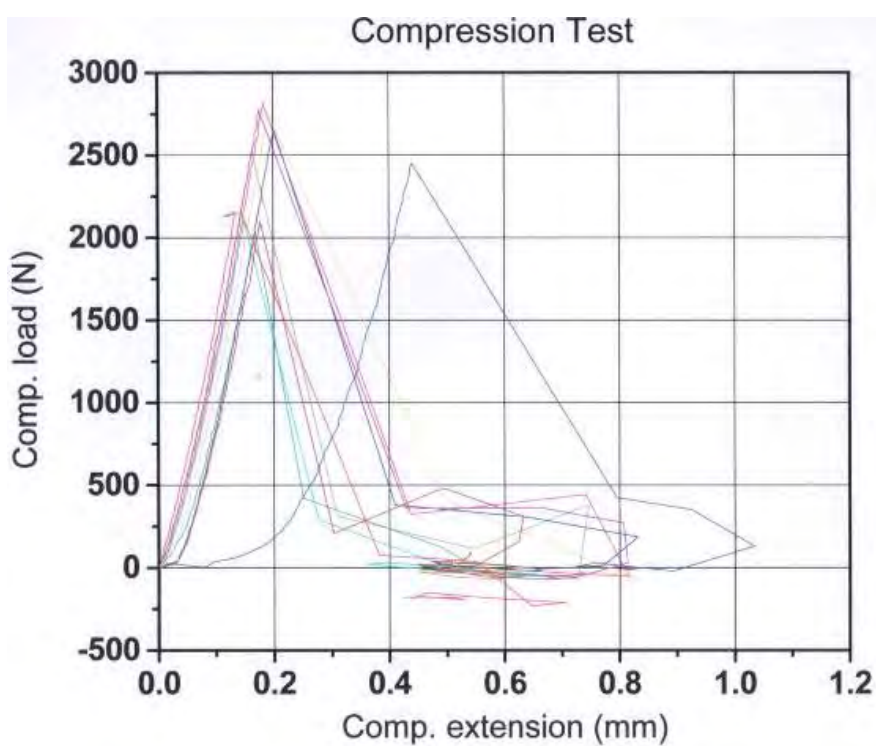


กลุ่มที่ 2

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ

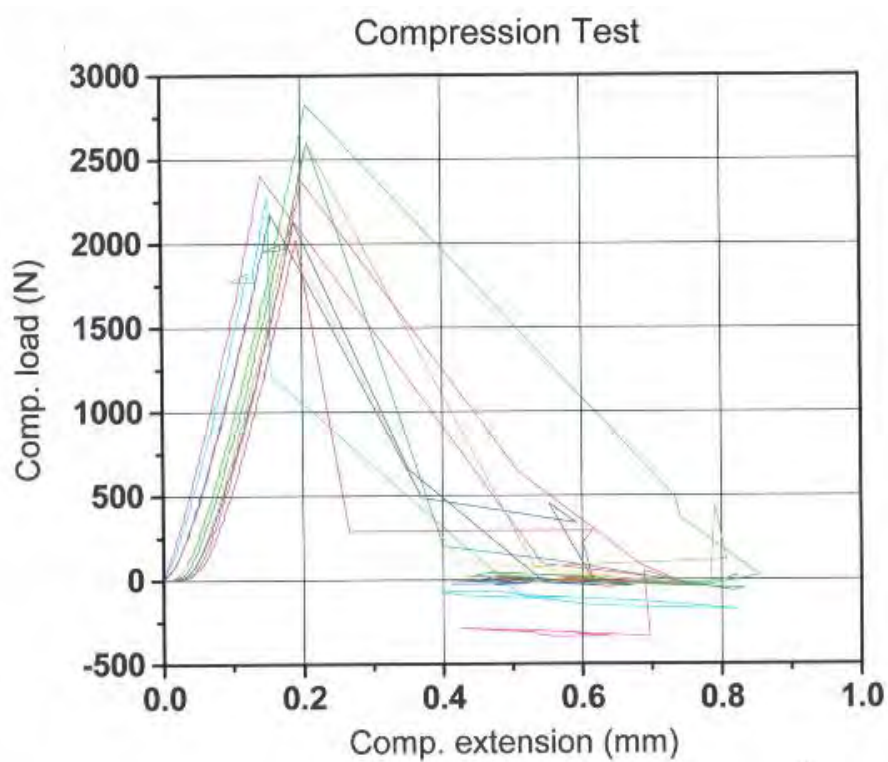


กลุ่มที่ 3

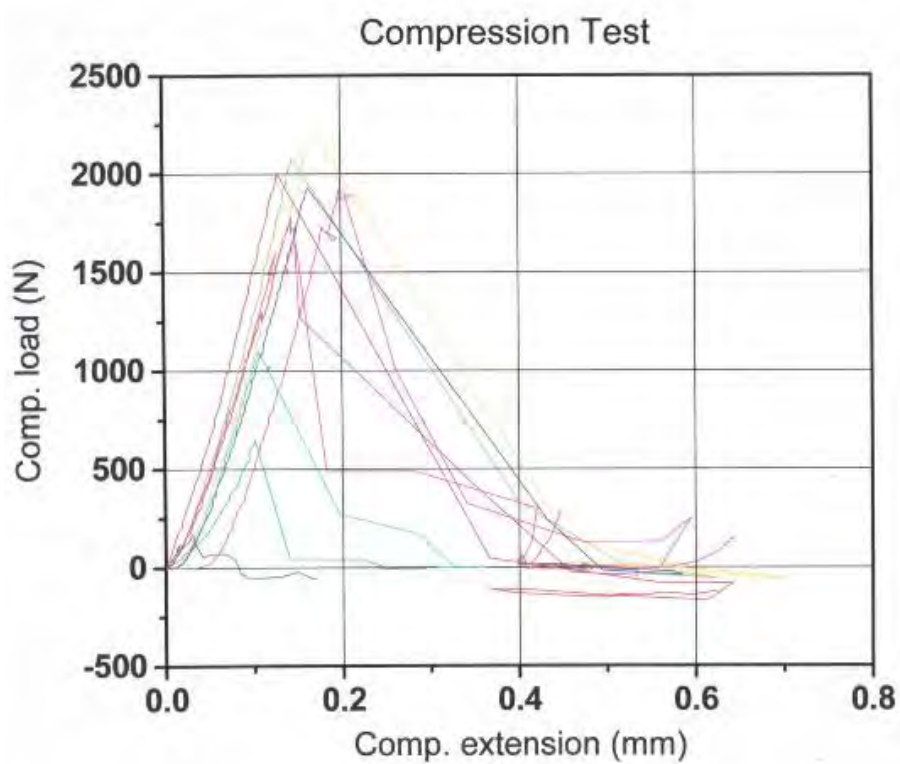


กลุ่มที่ 4

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)

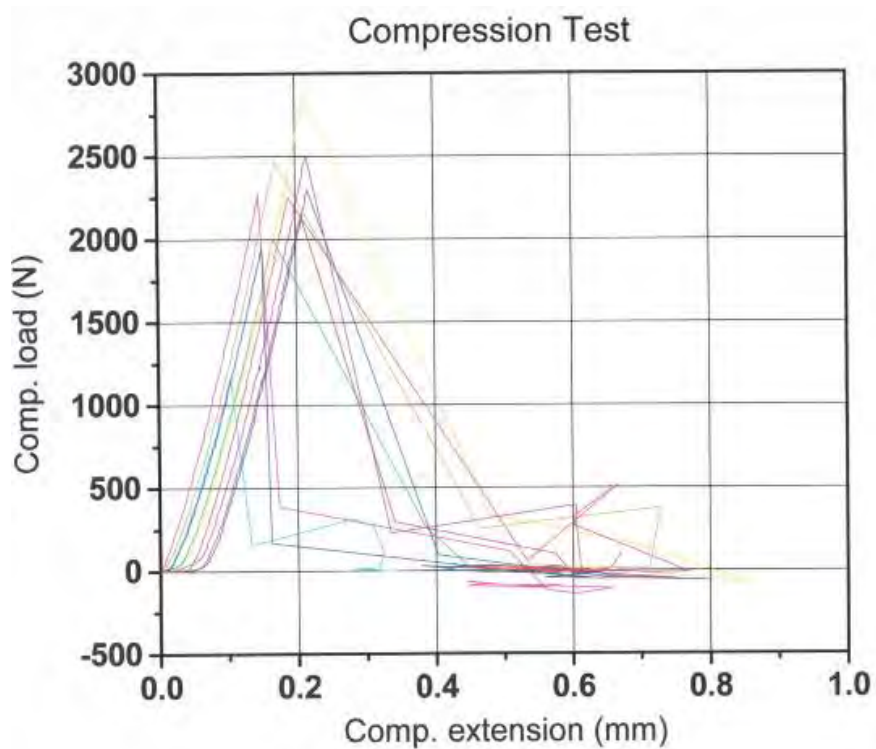


กลุ่มที่ 5

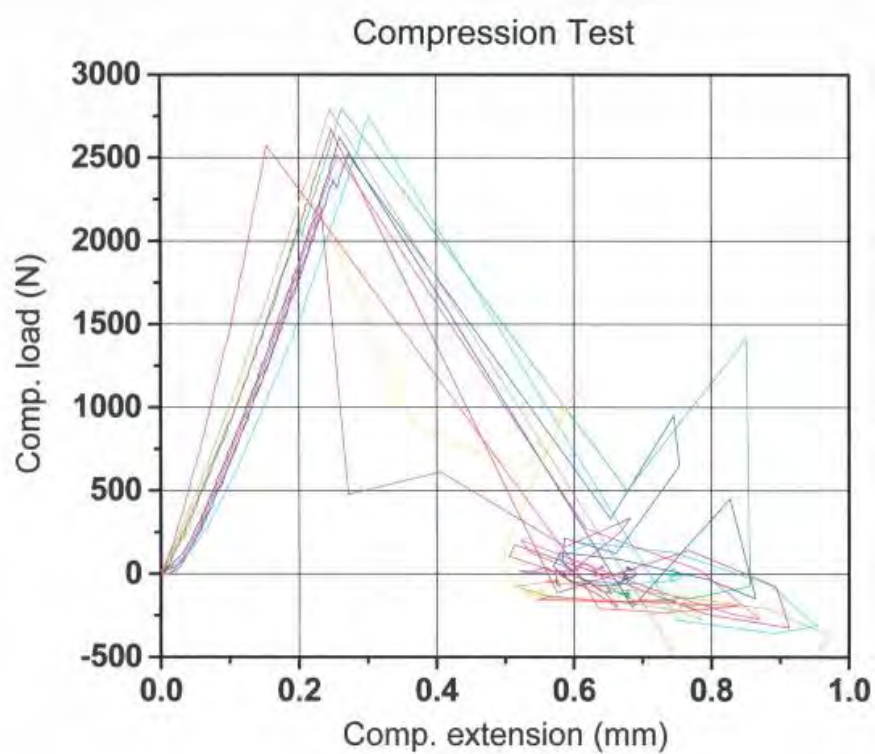


กลุ่มที่ 6

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)

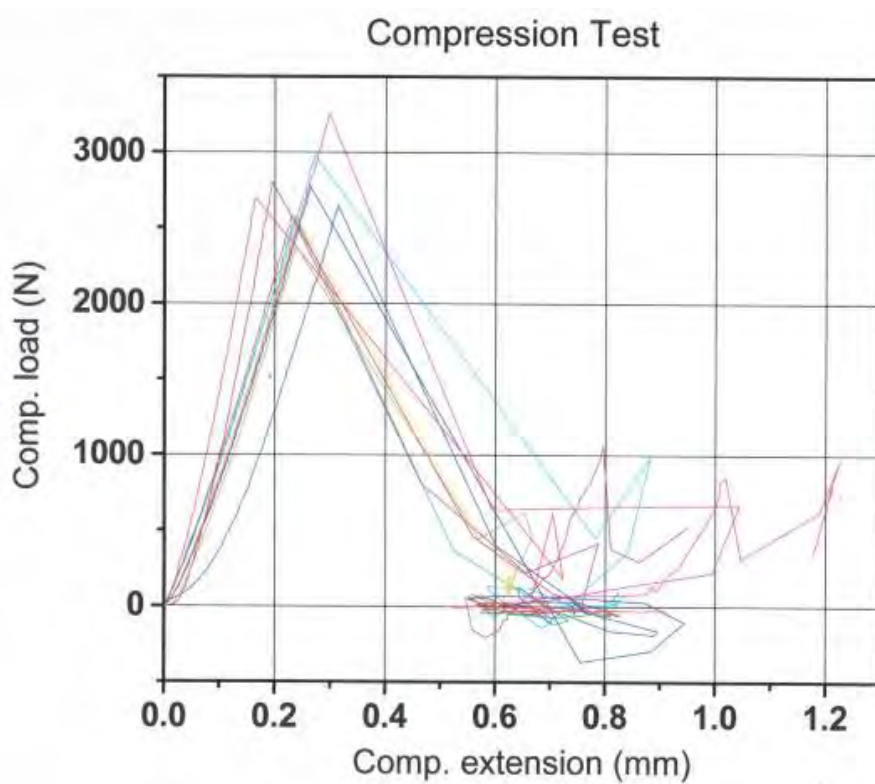


กลุ่มที่ 7

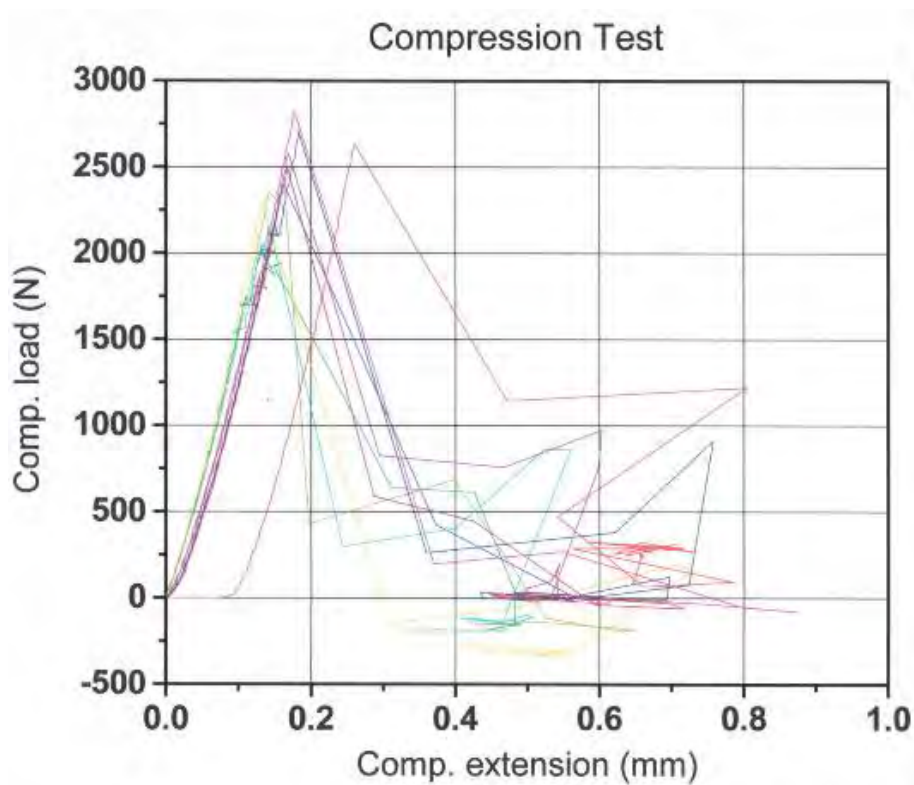


กลุ่มที่ 8

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)



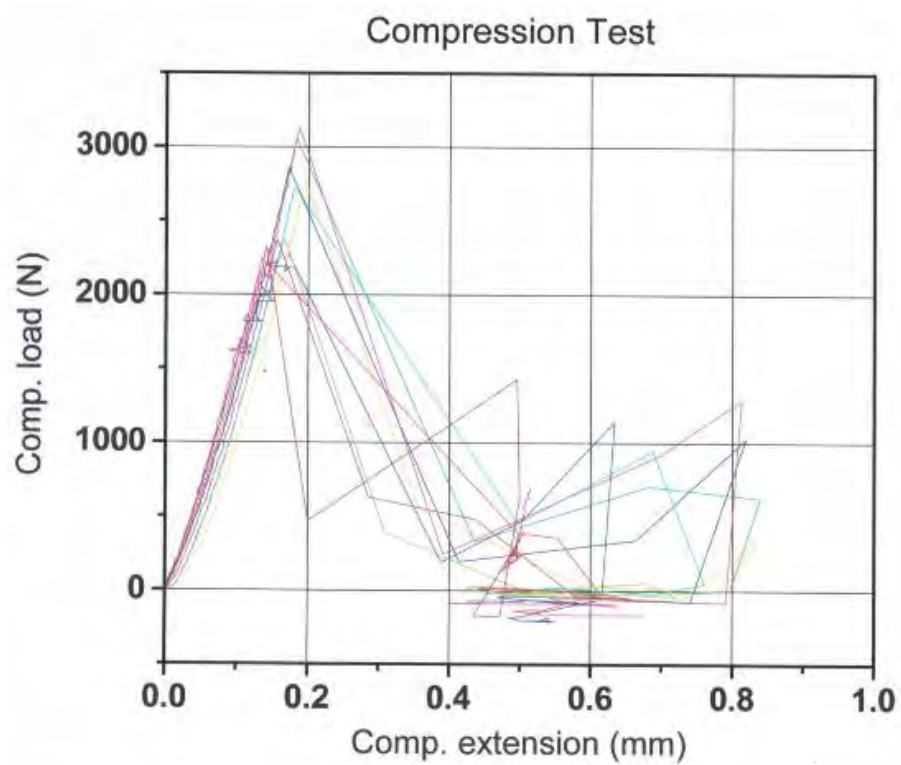
กลุ่มที่ 9



กลุ่มที่ 10

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)





กลุ่มที่ 11

ภาพที่ 22 แสดงลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างทำการทดลองของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)

## บทที่ 5

### อภิปราย ข้อเสนอแนะ และสรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อหาค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างที่มีความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลน สามารถอภิปรายได้ 2 ส่วน คือ อภิปรายระเบียบวิธีการวิจัย และอภิปรายผลการวิจัย ที่เกี่ยวกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างที่ทำการทดลอง

#### อภิปราย

##### 1. อภิปรายระเบียบวิธีการวิจัย

แม้ว่าแรงที่พบในช่องปากจะมีทั้ง แรงอัด แรงดึงและแรงเฉือน แต่แรงดึงและแรงเฉือนจะพบมากในการสบฟันนอกศูนย์ การบูรณะในบางครั้งสามารถที่จะควบคุมให้มีการสบฟันนอกศูนย์เป็นแบบการสบแนวนำฟันเขี้ยว (canine guidance occlusion) หรือ mutually protected occlusion ซึ่งเป็นการหลีกเลี่ยงหรือลดแรงดึงและแรงเฉือนที่จะเกิดขึ้นได้ ขณะที่แรงอัดเป็นแรงที่พบเสมอในการสบฟันในศูนย์ (centric occlusion) และน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้แรงอัดในการทดสอบความต้านทานในการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง จากการที่ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานในการทดสอบความทนแรงอัด (compressive strength) ของครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง ทั้งนี้เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผล เช่น ชนิดของการออกแบบครอบฟัน ความหนาของครอบฟัน ทิศทางของแรงที่ให้ตำแหน่งที่รับแรง รัศมีของหัวกดที่ให้แรง (loading stylus) (5, 82) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเตรียมชิ้นงานขึ้นมาให้มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเท่ากับด้านบดเคี้ยวของฟันกรามน้อยบน คือ 7 มม. x 9 มม. (93) ที่มีความหนาแตกต่างกันไป เนื่องจากต้องการวิเคราะห์เกี่ยวกับความหนาของโลหะและพอร์ซเลนเท่านั้น จึงตัดปัจจัยอื่นๆที่มีผลเกี่ยวกับค่าการแตกหักของพอร์ซเลนออกไป เช่น ชนิดของการออกแบบครอบฟัน ความเค้นแบบดึงออกจากศูนย์กลาง (radial tensile stress) และทำให้สามารถควบคุมความหนาที่ต้องการได้อย่างถูกต้องเที่ยงตรง

ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่เตรียมได้ จะนำมายึดด้วยซีเมนต์ฟอสเฟตซีเมนต์ (HY-Bond Zinc Phosphate Cement<sup>®</sup>, Shofu InC., Japan) บนแผ่นทองเหลืองขนาด 30 x 30 มม.<sup>2</sup> สูง 10 มม. เลียนแบบการศึกษาของ Tsai et al. (1998) (91) ที่ศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของไดคอร์แผ่นกลม (Dicor glass disk) ที่มีความหนาต่างกัน ซึ่งยึดอยู่บนแผ่นกลมอีพ็อกซีเรซิน (epoxy

resin disk) สาเหตุที่เลือกทองเหลืองมาเป็นแป้นทดสอบ เนื่องจากการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องในกรณีที่มีการปลดลึงกีดขวาง (occlusal clearance) ในปริมาณที่มาก จะพบบ่อยในการบูรณะด้วยรากฟันเทียมที่มีพื้นหลักยึดรากเทียม (implant abutment) ซึ่งทำมาจากโลหะผสมไทเทเนียมที่มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น 110-120 GPa ใกล้เคียงกับทองเหลืองที่มีค่า 96-110 GPa (94, 95)

การหาค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหัก โดยใช้หัวกดรูปทรงกลม (stainless steel stylus with round end carbide pin) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. เนื่องจากหัวกดที่เป็นทรงกลมจะสัมผัสกับชิ้นงานเป็นจุด แม้ว่าชิ้นงานที่ยืดจะไม่ขนานกับแนวระนาบเพียงเล็กน้อย หัวกดยังคงสัมผัสชิ้นงานเป็นจุดเท่าๆกันในทุกๆชิ้นงาน ซึ่งแตกต่างจากหัวกดที่มีพื้นที่หน้าตัด (flat-end cylinder pin) ถ้าชิ้นงานไม่ขนานกันเพียงเล็กน้อย พื้นที่สัมผัสที่ได้ในแต่ละชิ้นงานก็จะต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อค่าที่ได้ ส่วนความเร็วหัวกดที่ใช้คือ 1 มม./นาที เป็นความเร็วที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระจายแรงผ่านพอร์ซเลน เพราะถ้าความเร็วมากกว่านี้ค่าแรงอัดที่ทำให้พอร์ซเลนแตกจะมีค่าสูงเกินความจริง (80, 81)

## 2. อภิปรายผลการวิจัย

### 2.1 อภิปรายผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากวิธีการทดสอบจะเห็นว่าเมื่อให้แรงอัดในแนวตั้งกับชิ้นงานส่วนของพอร์ซเลนจะทำหน้าที่หลักในการรองรับแรง โดยคุณสมบัติของตัวพอร์ซเลนเองจะมีความต้านทานต่อแรงอัดสูงแต่มีความต้านทานต่ำต่อแรงดึง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการแตกหักของพอร์ซเลนเกิดขึ้นจากที่พอร์ซเลนไม่สามารถต้านทานต่อแรงอัดในแนวตั้งที่ได้รับ หรือเกิดจากความเค้นแบบดึง (tensile stress) ภายในพอร์ซเลน ซึ่งเป็นผลมาจากการผิดรูปเพียงเล็กน้อยของโลหะที่รองรับเมื่อได้รับแรง (26, 34, 35, 37, 49, 96) ดังนั้นความแข็งแรงของโครงโลหะจึงมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้อง (18, 22, 26, 34, 64)

ผลที่ได้จากการทดสอบผลของความผันแปรของความหนาของพอร์ซเลนที่มีความหนาของโลหะคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง พบว่ากลุ่มที่ 1-5 ที่มีความหนาของโลหะคงที่ 0.3 มม. แต่พอร์ซเลนหนาแตกต่างกัน คือ 0.70 มม. 1.35 มม. 2.00 มม. 2.65 มม. และ 3.30 มม. มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.291$ ) ซึ่งแตกต่างจากข้อเสนอแนะก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่าพอร์ซเลนไม่ควรมีความหนาเกินกว่า 2.0 มม. (4, 18, 23, 28, 30, 31, 38, 39) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าโลหะผสมนิเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม ที่มีความหนา 0.30 มม. ที่เลือกใช้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานต่อการผิดรูปที่เกิดขึ้นของโครงโลหะเมื่อได้รับแรง ซึ่งตรงกับข้อเสนอแนะก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่า ความหนาที่บางที่สุดของโลหะที่สามารถทำได้ คือ 0.30 มม. (4, 18, 20, 23,

28-30) ส่งผลให้ไม่มีความเค้นแบบดึงเกิดขึ้นกับพอร์ชเลน การแตกหักที่เกิดขึ้นของพอร์ชเลนจึงเกิดจากพอร์ชเลนไม่สามารถต้านทานต่อแรงอัดในแนวตั้งที่ได้รับเพียงอย่างเดียว จากการที่พอร์ชเลนมีความต้านทานต่อแรงอัดสูง ดังนั้นพอร์ชเลนที่มีความหนาต่างกันในช่วง 0.7-3.3 มม. ที่ถูกรองรับด้วยโลหะหนา 0.3 มม. จึงมีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ชเลนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.291$ ) ที่อำนาจการทดสอบทางสถิติ ตั้งแต่ 0.051-0.573

อำนาจการทดสอบทางสถิติ จะมีความสำคัญเมื่อผลของการวิจัยออกมาไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (97) โดยอำนาจการทดสอบทางสถิติ ก็คือความน่าจะเป็นของการปฏิเสธสมมติฐานว่าง (null hypothesis) เมื่อสมมติฐานว่างเป็นเท็จ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1-\beta$  ( $\beta = \text{type II error}$  เมื่อ  $\beta$  คือ ความน่าจะเป็นในการยอมรับสมมติฐานว่างเมื่อสมมติฐานว่างเป็นเท็จ) (97-103) ทั้งนี้อำนาจการทดสอบทางสถิติขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 อย่าง (101) คือ 1)ระดับนัยสำคัญทางสถิติ ( $\alpha = \text{level of significance}$ )หรือความคลาดเคลื่อนชนิดที่ 1(type I error) [เมื่อระดับนัยสำคัญทางสถิติ คือ โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน (103) และความคลาดเคลื่อนชนิดที่ 1 คือ ความน่าจะเป็นในการปฏิเสธสมมติฐานว่างเมื่อสมมติฐานว่างเป็นจริง (97-103)] ซึ่งถ้าระดับนัยสำคัญทางสถิติเพิ่มขึ้น อำนาจของการทดสอบจะเพิ่มมากขึ้น 2)จำนวนของขนาดตัวอย่าง เมื่อกลุ่มตัวอย่างมีขนาดเพิ่มมากขึ้น อำนาจของการทดสอบจะเพิ่มมากขึ้น และ3)ขนาดอิทธิพล (effect size) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้ (101) ในวิจัยครั้งนี้อำนาจการทดสอบทางสถิติที่ได้ค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เนื่องจากระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ 0.05 ซึ่งเป็นค่าปกติที่นิยมใช้ (98, 99, 101, 104) แต่ในบางกรณีอาจกำหนดที่ระดับอื่นก็ได้ เช่น ที่ระดับ 0.10 หรือ 0.15 (101) ถ้าในการทดลองนี้ลองเปลี่ยนค่าระดับนัยสำคัญเป็น 0.10 และ 0.15 ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้ก็เหมือนเดิมคือยอมรับสมมติฐานว่าง ( $p=0.291$ ) นั่นก็คือค่าเฉลี่ยของแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ชเลนของกลุ่มที่ 1-5 แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งที่การเพิ่มระดับนัยสำคัญทางสถิติจาก 0.05 ไปเป็น 0.10 หรือ 0.15 จะทำให้มีโอกาสที่จะยอมรับสมมติฐานว่างน้อยลง และเมื่อนำไปคำนวณหาอำนาจของการทดสอบทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.10 และ 0.15 พบว่าอำนาจการทดสอบที่ได้มีค่าตั้งแต่ 0.102-0.707 และ 0.152-0.779 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากที่คำนวณได้จากที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 จนมีค่าใกล้เคียงกับค่าอำนาจการทดสอบที่ต้องการคือ 0.8 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดที่ยอมรับได้ (97, 99) นอกจากนี้จำนวนของขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ 10 ซึ่งอาจจะเป็นปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้ได้อำนาจการทดสอบทางสถิติมากพอที่ต้องการ แต่ที่เลือกใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 10 เพราะจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าขนาดของตัวอย่างที่ส่วนใหญ่เลือกใช้หลายการศึกษาคือ 10 (3, 5, 69, 86-88, 90) ถ้าการทดลองนี้ทำการเพิ่มจำนวนของขนาดตัวอย่างให้มากพอที่จะทำให้ได้อำนาจการทดสอบทางสถิติมีค่า 0.8 ซึ่งต้องใช้ขนาดตัวอย่างมากถึง 6941 โดยคำนวณจาก PS power and sample size

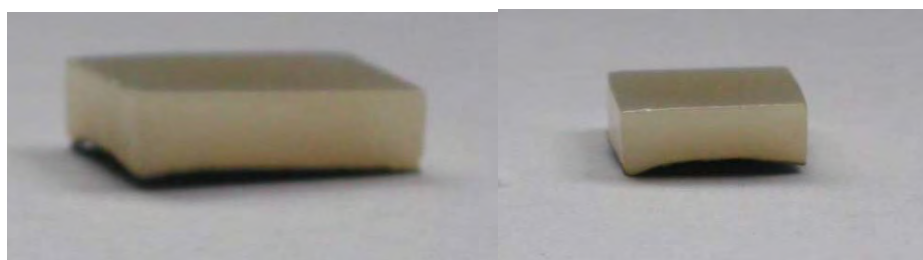
program (Version 2.1.30) (92) ผลที่ได้จากการทดลองนี้อาจมีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนอย่างไม่มียุทธศาสตร์ทางสถิติเหมือนที่ได้จากการทดลองนี้ก็ได้ หรือมีแนวโน้มที่จะมียุทธศาสตร์ทางสถิติก็ได้ ดังนั้นการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้มาใช้กับข้อมูลที่มีอำนาจการทดสอบทางสถิติค่อนข้างน้อย ก็อาจจะเป็นข้อจำกัดที่ทำให้ได้ข้อสรุปที่ไม่น่าเชื่อถือมากนัก แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการเตรียมชิ้นงานได้มีการควบคุมคุณภาพให้ชิ้นงานทุกชิ้นอยู่ในมาตรฐานเดียวกัน และการทดสอบสมมติฐานข้อที่สอง ซึ่งเกี่ยวกับผลของความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.000$ ) ของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักของกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่เตรียมได้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน แม้จะมีขนาดตัวอย่างเพียง 10 ชิ้น หรือมากกว่านี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ได้ก็ไม่ควรจะแตกต่างไปเดิม

แม้ว่าพอร์ซเลนจะมีความสามารถในการรองรับแรงอัดในแนวตั้งที่ได้รับ แต่คุณสมบัติของพอร์ซเลนที่มีความเปราะอย่างมาก ดังนั้นบางส่วนของแรงที่ได้รับจะถูกรองรับโดยโครงโลหะ ซึ่งก็หมายถึง ความแข็งแรงของโลหะเคลือบกระเบื้องจะเพิ่มมากขึ้นถ้าโลหะที่รองรับมีความแข็งแรงมากขึ้นโดยการเพิ่มความหนาของโลหะ (26) อย่างไรก็ตามความหนาของโลหะไม่จำเป็นต้องมีความหนามากเกินความจำเป็น แต่ต้องมีความหนาเพียงพอที่จะต้านทานต่อการผิรุ่ยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมชิ้นงานและเมื่อได้รับแรงได้ (23, 26, 30, 37, 49, 65) ซึ่งเห็นได้จากอีกส่วนหนึ่งที่ทำการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ คือ ผลของความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.00 มม. ต่อการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง พบว่า กลุ่มที่ 6 ซึ่งมีโลหะหนา 0.1 มม. มีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) กับกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 8-11 ซึ่งมีโลหะหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. ตามลำดับ และมีค่าต่ำที่สุด โดยต่ำกว่ากลุ่มที่มีโลหะหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. ถึง 69.50% 65.40% 75.50% 57.99% และ 68.35% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์อาจเกิดจากชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่โลหะมีความหนา 0.10 มม. เกิดความโค้งงอของชิ้นงานขึ้นในกระบวนการเตรียมชิ้นงาน ซึ่งสังเกตได้ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมพื้นผิวโลหะ ทั้งการเป่าทราย และการเผาเพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ของโลหะ (oxidizing) ซึ่งขั้นตอนนี้พบการโค้งงอมากที่สุด รวมไปถึงขั้นตอนการเผาเพื่อขึ้นรูปพอร์ซเลนซึ่งชิ้นงานจะเกิดการโค้งงอมากขึ้น (ภาพที่ 23) การที่ชิ้นงานมีความโค้งงอทำให้ความหนาของพอร์ซเลนไม่สม่ำเสมอกันตลอดชิ้นงาน แต่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานที่ได้รับแรงกดยังคงมีความหนา 2.00 มม. เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอกำลังขยาย 15 เท่าก็ไม่พบรอยร้าว

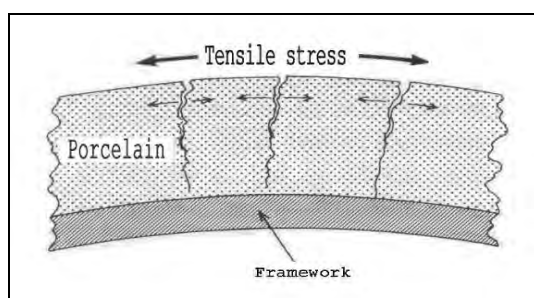
เกิดขึ้นในงาน การบิดรูปที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมชิ้นงาน จะเกิดมากที่สุดในช่วงขั้นตอนการเผาเพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยความเค้นที่เหลือตกค้างอยู่ (internal residual stress) เนื่องจากชิ้นโลหะมีความเครียด (strain) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหล่อชิ้นงาน (casting) (35, 64, 96, 105) นอกจากนี้การบิดรูปยังเกิดขึ้นจากขั้นตอนการเผาพอร์ซเลน ที่เกิดเนื่องจากการที่โลหะไม่สามารถต้านทานต่อแรงที่เกิดจากการหดตัวของพอร์ซเลน (contractional force or shrinkage) ได้ แต่การบิดรูปที่เกิดจากการเผาพอร์ซเลนจะเกิดไม่มากเท่ากับที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างชั้นออกไซด์ (35, 64, 105) ผลที่เกิดจากการบิดรูปในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน จะทำให้เกิดความเครียดแบบดึง (tensile strain) ขึ้นในพอร์ซเลน (65) และยังคงส่งผลให้เกิดความเค้นแบบดึงขึ้นที่ชั้นของพอร์ซเลนทำให้อายุการใช้งานบริเวณพื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้น (ภาพที่ 24) ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรง (26) นอกจากนี้แล้วอาจเกิดจากโลหะที่หนา 0.1 มม. บางมากเกินไปทำให้ไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานการบิดรูปที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรง โดยแรงอัดที่ให้จะทำให้เกิดการงอ (bending) ในส่วนที่เป็นโลหะ ซึ่งการบิดรูปเพียงเล็กน้อยของโลหะจะส่งผลให้พอร์ซเลนเกิดความเค้นแบบดึง ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักตามมา (26, 34, 35, 37, 49, 96) ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีชิ้นงานหลุดออกจากเป็นทองเหลืองหลังจากได้รับแรงอัด โดยที่ยังมีชั้นของซีเมนต์ติดอยู่ที่ เป็นทองเหลือง แสดงให้เห็นว่าโลหะหนา 0.1 มม. ไม่แข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรง อาจส่งผลให้มีการส่งผ่านแรงในปริมาณที่มากมาถึงชั้นของซีเมนต์ ทำให้เกิดการแตกหักของซีเมนต์บริเวณพื้นผิวระหว่างรอยต่อของซีเมนต์และโลหะ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า โครงโลหะที่มีความหนา 0.10 มม. มีความหนาไม่เพียงพอที่จะต้านทานการบิดรูปที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมชิ้นงานและเมื่อได้รับแรง จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานทางคลินิก ซึ่งแตกต่างจากข้อเสนอแนะก่อนหน้านี้ที่กล่าวว่าความหนาที่น้อยที่สุดของโลหะผสมไร้สกรูที่สามารถทำได้ คือ 0.10 มม. (20)

ผลที่ได้ในกลุ่มที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.00 มม. แต่มีความหนาของโลหะต่างกัน คือ 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. จะมีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน และมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) กับกลุ่มที่มีโลหะหนา 0.10 มม. แสดงให้เห็นว่าโลหะที่มีความหนาดังแต่ 0.3-1.3 มม. มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานการบิดรูปที่เกิดขึ้นเมื่อรับแรงได้ ซึ่งตรงกับข้อเสนอแนะก่อนหน้าที่ว่าความหนาที่น้อยที่สุดของโลหะที่สามารถทำได้ คือ 0.3 มม. (4, 18, 20, 23, 28-30) แต่ไม่มีความหนาที่มากที่สุดของโลหะ (18, 30, 36) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 1 (ภาพที่ 25) จะเห็นว่าแรงที่ทำให้เกิดระดับของการบิดรูปที่เท่ากันเป็นสัดส่วนกับความหนา ยกกำลังสาม เช่น ถ้าเพิ่มความหนาของโลหะ

จาก 0.1 ม.ม. เป็น 0.3 ม.ม. จะต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นถึง 27 เท่า ในการที่จะทำให้เกิดการผิดรูปในระดับที่เท่ากัน (26, 49, 65) ดังนั้นการแตกหักของพอร์ซเลนในกลุ่มที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.00 ม.ม. แต่มีความหนาของโลหะต่างกันตั้งแต่ 0.3-1.3 ม.ม. น่าจะเกิดจากพอร์ซเลนไม่สามารถต้านทานต่อแรงอัดในแนวตั้งที่ได้รับเพียงอย่างเดียว เนื่องจากโลหะมีการผิดรูปน้อยมากเมื่อได้รับแรง จากการที่พอร์ซเลนมีความต้านทานต่อแรงอัดสูง ดังนั้นค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนจึงแตกต่างกันอย่างไม่มีความสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ )



ภาพที่ 23 แสดงการโค้งงอของชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องกลุ่มที่ 6 ซึ่งโลหะหนา 0.10 ม.ม



ภาพที่ 24 แสดงรอยร้าวเล็กๆที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อพอร์ซเลนได้รับความเค้นแบบดึง ส่งผลให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนได้ง่ายขึ้น

(ดัดแปลงจาก Yamamoto M. Factors affecting the strength of metal-ceramics. Metal-ceramics; Principles and methods of Makato Yamamoto. Chicago: Quintessence; 1985. p.22)

$$F = b^3 \times \frac{4aE\alpha}{l^3} \dots\dots(1)$$

เมื่อ E = ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น

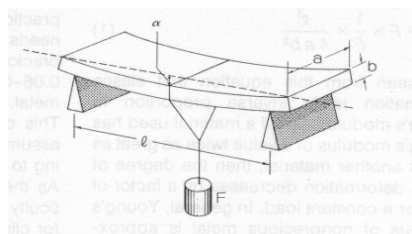
a = ความกว้าง

b = ความหนา

l = ระยะห่างระหว่างตัวรองรับ

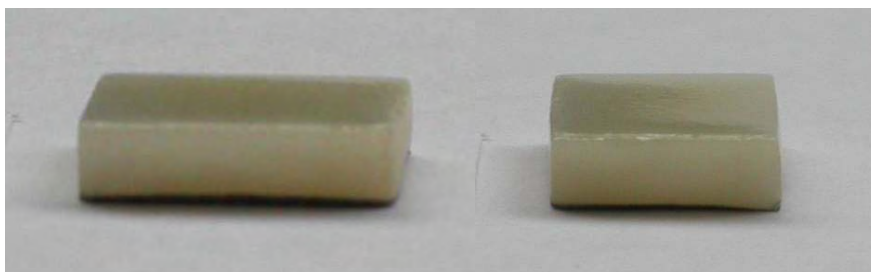
F = แรง

$\alpha$  = ระดับของการผิดรูป



ภาพที่ 25 แสดงสมการของความสัมพันธ์ของแรง ความหนา และระดับของการผิดรูปของโลหะ (ที่มา Yamamoto M. Factors affecting the strength of metal-ceramics. Metal-ceramics; Principles and methods of Makato Yamamoto. Chicago: Quintessence; 1985. p.23-24)

ส่วนผลที่ได้จากกลุ่มที่ 7 ซึ่งโลหะหนา 0.2 ม.ม. แม้ว่าค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) กับกลุ่มอื่นๆที่มีความหนาของโลหะต่างกัน (โลหะหนา 0.1 ม.ม. 0.3 ม.ม. 0.4 ม.ม. 0.7 ม.ม. 1.0 ม.ม. และ 1.3 ม.ม.) แต่ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีโลหะหนา 0.2 ม.ม. ก็ไม่สามารถที่จะต้านทานการผิครูปที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมชิ้นงานได้ แม้ว่าการผิครูปที่เกิดขึ้นจะเกิดน้อยกว่ากลุ่มที่มีความหนาของโลหะ 0.1 ม.ม. ก็ตาม (ภาพที่ 26) ซึ่งตรงกับข้อเสนอของ Rosenstiel et al., 2001 (23) ที่กล่าวว่าโลหะที่มีความหนาน้อยกว่า 0.3 ม.ม. จะนำไปสู่การผิครูปที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาได้ นอกจากนี้ยังพบชิ้นงานที่โลหะมีความหนา 0.2 ม.ม. จำนวน 2 ชิ้น มีการหลุดออกจากเป็นทองเหลืองหลังจากได้รับแรงอัด ดังนั้นความหนาของโลหะ 0.2 ม.ม. ก็ไม่ควรที่จะนำมาพิจารณาใช้ แม้ว่าก่อนหน้านี้จะมีการเสนอแนะว่าสามารถทำโครงโลหะได้บางถึง 0.2 ม.ม. ก็ตาม (4, 20-26)



ภาพที่ 26 แสดงการโค้งงอของชิ้นงาน โลหะเคลือบกระเบื้องกลุ่มที่ 7 ซึ่งโลหะหนา 0.20 ม.ม.

นอกจากนี้การที่ชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่โลหะหนา 0.1 และ 0.2 ม.ม. มีการโค้งงอ เมื่อมาทำการทดสอบโดยการให้แรงอัดกับชิ้นงาน อาจทำให้คิดว่าพอร์ซเลนเกิดการแตกหักในลักษณะที่คล้ายกับการทดสอบกำลังคดงอ (bending test) ซึ่งต่างไปจากสถานะของการทดสอบในกลุ่มอื่นที่ชิ้นงานไม่มีการโค้งงอ แต่ในการทดลองนี้ได้ทำการปิดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างโครงโลหะของชิ้นงานและเป็นทองเหลืองทดสอบด้วยซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ที่มีการควบคุมอัตราส่วนของส่วนผงและส่วนเหลว ก่อนทำการให้แรงอัดด้วยหัวกดทรงกลมที่มีการสัมผัสเป็นจุด (point contact) ที่กึ่งกลางชิ้นงานที่มีความหนาของพอร์ซเลน 2.0 ม.ม. ทำให้ทุกชิ้นงานในทุกกลุ่มอยู่ในสถานะเดียวกัน ซึ่งเห็นได้จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่โลหะหนา 0.2 ม.ม. มีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) กับกลุ่มที่มีโลหะหนา 0.1 ม.ม. ที่ชิ้นงานมีความโค้งงอเหมือนกัน และกลุ่มที่โลหะหนา 0.3 ม.ม. 0.4 ม.ม. 0.7 ม.ม. 1.0 ม.ม. และ 1.3 ม.ม. ที่ชิ้นงานไม่มีความโค้งงอ แสดงว่าซีเมนต์จะทำหน้าที่ในการรองรับแรงและทำให้มีการกระจายแรงที่สม่ำเสมอ ดังนั้นค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนน่าจะขึ้นอยู่กับโลหะที่รองรับว่ามีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานต่อการ



ผิครูปที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงมากน้อยแค่ไหน ถ้าโลหะสามารถต้านทานต่อการผิครูปได้ค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนที่ได้จะมีค่ามาก ขณะที่ถ้ามีการผิครูปเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้เกิดความเค้นแบบดึงขึ้นในพอร์ซเลน และเกิดการแตกหักของพอร์ซเลนตามมา ค่าแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนที่ได้จึงมีค่าน้อย

การนำผลที่ได้จากการศึกษาการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงาน โลหะเคลือบ กระเบื้องที่มีความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลนครั้งนี้ อาจนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ทางคลินิกได้ ในกรณีที่มีการปิดสิ่งกีดขวาง (occlusal clearance) อยู่ในช่วงประมาณ 1.0-3.6 มม. ที่ต้องการบูรณะด้วยครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้อง เช่น ต้องการแทนที่ฟันหลังซึ่งเดิมด้วยรากเทียมที่มีการละลายตัวของสันเหงือกบริเวณนั้นมากและฟันหลักยึดรากเทียม (implant abutment) มีความสูงจำกัด ถ้าพิจารณาที่จะเลือกการบูรณะด้วยโลหะเคลือบกระเบื้องที่สร้างจากโลหะผสมไร้สกลูที่มีความหนาเพียง 0.3 มม. และแทนที่ช่องว่างที่เหลือด้วยพอร์ซเลนที่มีความหนาไม่เกิน 3.3 มม. ก็สามารถที่จะทำได้ เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองพบว่าผลของความผันแปรของความหนาของพอร์ซเลนที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 0.7-3.3 มม. แต่มีความหนาของโลหะคงที่ 0.3 มม. มีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) และผลที่ได้จากการทดลองผลของความผันแปรของโลหะที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2 มม. พบว่าโลหะที่มีความหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหัก ( $p>0.05$ ) แต่การทดลองนี้เป็นการให้แรงอัดในแนวตั้ง ซึ่งพอร์ซเลนมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อแรงอัดสูง ดังนั้นควรที่จะสร้างครอบฟันโลหะเคลือบกระเบื้องให้แรงที่มากกระทำเป็นแรงอัด เช่น สร้างให้มีการสบฟันนอกศูนย์ที่มีการสบฟันเป็นแบบการสบแนวนำฟันเขี้ยว (canine guidance occlusion) หรือ mutually protected occlusion เป็นการหลีกเลี่ยงแรงดึงและแรงเฉือน และส่วนของพอร์ซเลนจะต้องมีโครงโลหะรองรับ เพื่อลดความล้มเหลวที่จะเกิดขึ้นจากการแตกหักของพอร์ซเลน

## 2.2 อภิปรายลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างที่ทำการทดลอง

จากลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ระหว่างที่ทำการทดลอง พบว่าในกลุ่มที่ 1 ซึ่งพอร์ซเลนมีความบางที่สุดคือหนา 0.7 มม ช่วงแรกของกราฟจะเป็นเส้นทแยงที่ตรงก่อนแล้วตามด้วยเส้นที่ค่อนข้างโค้งซึ่งมีรอยหยักไปมา แสดงถึงการมีรอยร้าวเกิดขึ้นในพอร์ซเลนก่อนที่จะถึงจุดสูงสุดของกราฟที่เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน สอดคล้องกับสิ่งที่สังเกตได้ขณะที่ทำการทดสอบ ซึ่งเมื่อให้แรงอัดกับชิ้นงานจนถึงจุดหนึ่งจะได้ยินเสียงกรอบแกรบเบาๆ เกิดขึ้นอย่าง

ต่อเนื่องช่วงหนึ่งก่อน แล้วตามมาด้วยเสียงที่ดังขึ้นอย่างมากขณะที่เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับชิ้นงานที่พบว่ามียอรร่าวปริมาณมากบนชิ้นงานหลังจากทำการทดสอบ (ภาคผนวกภาพ ณ) ในกลุ่มที่ 2 พอร์ซเลนหนา 1.35 ม.ม. เมื่อให้แรงอัดกับชิ้นงานจนถึงจุดหนึ่งจะได้ยินเสียงกรอบแกรบเบาๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องช่วงหนึ่งก่อนแต่เป็นช่วงสั้นๆ แล้วตามมาด้วยเสียงที่ดังขึ้นอย่างมากขณะที่เกิดการแตกหักของพอร์ซเลน ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟที่บันทึกได้ ที่พบว่ามียอรร่าวที่ไปมาเล็กน้อยในช่วงแรกของกราฟ ส่วนกลุ่มที่ 3-11 ที่มีพอร์ซเลนหนาตั้งแต่ 2.0-3.3 ม.ม. พบว่าขณะที่ให้แรงอัดกับชิ้นงานจะไม่ได้ยินเสียงกรอบแกรบเบาๆ เกิดขึ้นแต่จะได้ยินเสียงดังเกิดขึ้นครั้งเดียวตอนที่พอร์ซเลนเกิดการแตกหัก ซึ่งก็สัมพันธ์กับลักษณะของกราฟที่บันทึกได้ ที่ส่วนใหญ่ของกราฟช่วงแรกจะเป็นเส้นทแยงที่ตรงต่อเนื่องกันไปจนถึงจุดสูงสุดของกราฟที่มีการแตกหักของพอร์ซเลน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าชิ้นงานที่พอร์ซเลนมีความหนา 0.7 ม.ม. และ 1.35 ม.ม. จะเกิดการร้าวของพอร์ซเลนอย่างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหักของพอร์ซเลนตามมาก ซึ่งแตกต่างจากชิ้นงานที่พอร์ซเลนมีความหนา 2.0 ม.ม. 2.65 ม.ม. และ 3.3 ม.ม. ซึ่งพอร์ซเลนจะเกิดการแตกหักทันที หรือเริ่มต้นเกิดรอยร้าวแล้วตามด้วยการแตกหักของพอร์ซเลนทันที

## ข้อเสนอแนะ

เนื่องการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาทางห้องปฏิบัติการ ที่ทำการทดสอบโดยให้แรงอัดในแนวตั้งกับชิ้นงานจนเกิดการแตกหักด้วยแรงเพียงครั้งเดียว (single catastrophic load) ซึ่งแตกต่างจากความล้มเหลวที่เกิดจริงภายในช่องปาก ซึ่งแรงที่ได้รับจะเป็นแรงพลวัตซ้ำหลายครั้ง (repetitive dynamic load) หรือแรงด้า นอกจากนั้นแล้ว การทดลองนี้ไม่สามารถจำลองความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในช่องปากและความซับซ้อนของสิ่งแวดล้อมในช่องปากได้ทั้งหมด ซึ่งจะมีปัจจัยอื่นๆที่นอกเหนือไปจากความแข็งแรงเชิงกลศาสตร์ของวัสดุเองเข้ามามีบทบาทภายใต้การได้รับแรงเชิงกล (mechanical environmental load) เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของพอร์ซเลน ดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่สามารถบ่งบอกถึงคุณสมบัติของวัสดุในระยะยาวได้ (long term material property) และไม่สามารถนำค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนที่ได้ไปอ้างอิงถึงแรงบดเคี้ยว (normal occlusal force) ที่เกิดขึ้นจริงในช่องปากจากการบดเคี้ยวฟันด้วยการใช้โลหะเคลือบกระเบื้องในทางคลินิกได้ แต่ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในทางคลินิกต่อไป เพื่อลดอัตราการแตกหักของพอร์ซเลนทางคลินิกได้

การศึกษานี้ครอบคลุมเฉพาะชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีความผันแปรของความหนาของโลหะและพอร์ซเลนที่เตรียมขึ้นมาจากโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-โมลิบดีนัม เท่านั้น ในอนาคตควรที่จะมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่เตรียมมาจากโลหะผสมชนิดอื่นๆ เช่น โลหะผสมมีสกุลสูง (high-noble alloys) และโลหะผสมมีสกุล (noble alloys) เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้นในการนำมาประยุกต์ใช้ทางคลินิกต่อไป

## สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความผันแปรของความหนาของพอร์ซเลนที่มีความหนาโลหะคงที่ไม่มีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง ( $p=0.291$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) โดยชิ้นงานมีโลหะหนาคงที่ 0.3 มม. ขณะที่มีความหนาของพอร์ซเลนต่างกันทั้ง 5 กลุ่ม คือ 0.7 มม. 1.35 มม. 2.0 มม. 2.65 มม. และ 3.3 มม.

2. ความผันแปรของความหนาของโลหะที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่มีผลต่อแรงที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้อง ( $P=0.000$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha=0.05$ ) โดยชิ้นงานโลหะเคลือบกระเบื้องที่มีความหนาของพอร์ซเลนคงที่ 2.00 มม. แต่มีความหนาของโลหะ 0.1 มม. จะมีค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของพอร์ซเลนต่ำที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) กับกลุ่มที่โลหะมีความหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. ขณะที่กลุ่มที่มีโลหะหนา 0.3 มม. 0.4 มม. 0.7 มม. 1.0 มม. และ 1.3 มม. มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ ) นอกจากนี้กลุ่มที่มีโลหะหนา 0.20 มม. มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้พอร์ซเลนเกิดการแตกหักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) กับกลุ่มอื่นๆ ที่มีโลหะหนาต่างกัน

## รายการอ้างอิง

1. Prince J, Donovan T. The esthetic metal-ceramic margin: a comparison of techniques. J Prosthet Dent. 1983 Aug;50(2):185-92.
2. Coornaert J, Adriaens P, De Boever J. Long-term clinical study of porcelain-fused-to-gold restorations. J Prosthet Dent. 1984 Mar;51(3):338-42.
3. Gardner FM, Tillman-McCombs KW, Gaston ML, Runyan DA. In vitro failure load of metal-collar margins compared with porcelain facial margins of metal-ceramic crowns. J Prosthet Dent. 1997 Jul;78(1):1-4.
4. Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. Framework design and metal section for metal-ceramic restorations. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. 3 rd ed. St.Louis: Mosby; 2001. p. 488-97.
5. Ku CW, Park SW, Yang HS. Comparison of the fracture strengths of metal-ceramic crowns and three ceromer crowns. J Prosthet Dent. 2002 Aug;88(2):170-5.
6. Ozcan M, Niedermeier W. Clinical study on the reasons for and location of failures of metal-ceramic restorations and survival of repairs. Int J Prosthodont. 2002 May-Jun;15(3):299-302.
7. Strub JR, Stiffler S, Scharer P. Causes of failure following oral rehabilitation: biological versus technical factors. Quintessence Int. 1988 Mar;19(3):215-22.
8. Walton JN, Gardner FM, Agar JR. A survey of crown and fixed partial denture failures: length of service and reasons for replacement. J Prosthet Dent. 1986 Oct;56(4):416-21.
9. Cheung GS. A preliminary investigation into the longevity and causes of failure of single unit extracoronal restorations. J Dent. 1991 Jun;19(3):160-3.
10. Gladwin M, Bagby M. Materials for fixed indirect restorations and prostheses. In: Gladwin M, Bagby M, editors. Clinical aspects of dental materials: Theory, practice, and cases. 2 nd ed. Maryland: Lippincott williams & wilkins; 2004. p. 137-50.
11. Diaz-Arnold AM, Schneider RL, Aquilino SA. Bond strengths of intraoral porcelain repair materials. J Prosthet Dent. 1989 Mar;61(3):305-9.
12. Llobell A, Nicholls JI, Kois JC, Daly CH. Fatigue life of porcelain repair systems. Int J Prosthodont. 1992 May-Jun;5(3):205-13.

13. Anusavice KJ, Zhang NZ. Chemical durability of Dicor and fluorocanite-based glass-ceramics. J Dent Res. 1998 Jul;77(7):1553-9.
14. Ozcan M. Fracture reasons in ceramic-fused-to-metal restorations. J Oral Rehabil. 2003 Mar;30(3):265-9.
15. Chung KH, Hwang YC. Bonding strengths of porcelain repair systems with various surface treatments. J Prosthet Dent. 1997 Sep;78(3):267-74.
16. Yanikoglu N. The repair methods for fractured metal-porcelain restorations: a review of the literature. Eur J Prosthodont Restor Dent. 2004 Dec;12(4):161-5.
17. Stein RS, Kuwata M. A dentist and a dental technologist analyze current ceramo-metal procedures. Dent Clin North Am. 1977 Oct;21(4):729-49.
18. Lau CS, Yamada HN. Ceramometal restorations. In: Eissmann HF, Rudd KD, Morrow RM, editors. Dental laboratory procedures: Volume two: Fixed partial dentures. St.Louis: The C.V.Mosby; 1980. p. 267-79.
19. Drummond JL. Ceramics behavior under different environmental and loading conditions. In: Eliades G, Eliades T, Brantley WA, Watts DC, editors. Dental material in vivo: Aging and related phenomena. Chicago: Quintessence; 2003. p. 35-45.
20. Weiss PA. New design parameters: utilizing the properties of nickel-chromium superalloys. Dent Clin North Am. 1977 Oct;21(4):769-85.
21. Connor RJ. Porcelain-fused-to-metal restorations. In: Thayer KE, editor. Fixed prosthodontics. Chicago: Year Book Medication; 1984. p. 53-60.
22. Preston JD. Rational approach to tooth preparation for ceramo-metal restorations. Dent Clin North Am. 1977 Oct;21(4):683-98.
23. Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. Metal-ceramic restorations. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. 3 rd ed. St.Louis: Mosby; 2001. p. 609-14.
24. Shillingburg HT, Hobo S, Whitsett LD, Jacobi R, Brackett SE. Metal-ceramic restorations. In: Shillingburg HT, Hobo S, Whitsett LD, Jacobi R, Brackett SE, editors. Fundamentals of fixed prosthodontics. 3 rd ed. Chicago: Quintessence; 1997. p. 455-83.
25. Yamamoto M. Esthetics. In: Yamamoto M, editor. Metal-ceramics: Principles and methods of Makoto Yamamoto. Chicago: Quintessence; 1985. p. 219-305.

26. Yamamoto M. Factors affecting the strength of metal-ceramics. In: Yamamoto M, editor. Metal-ceramics: Principles and methods of Makoto Yamamoto. Chicago: Quintessence; 1985. p. 15-202.
27. Tylman SD. Dental restorations using ceramics fired to gold alloy castings. In: Tylman SD, Malone WFP, editors. Tylman's theory and practice of fixed prosthodontics. 7 th ed. Saint. Louis: The C.V. Mosby; 1978. p. 629-48.
28. Lau CS, Yamada HN. Metal-ceramic crowns and fixed partial dentures. In: Rhoads JE, Rudd KD, Morrow RM, editors. Dental laboratory procedures: volume II: fixed partial dentures. 2 nd ed. St. Louis: CV Mosby; 1986. p. 270-81.
29. Miller LL. Framework design in ceramo-metal restorations. Dent Clin North Am. 1977 Oct;21(4):699-716.
30. Naylor WP. Essentials of metal ceramic substructure design. In: Naylor WP, editor. Introduction to metal ceramic technology. Chicago: Quintessence; 1992. p. 43-64.
31. Bell AM. The ceramo-metal restoration. Quintessence Dent Technol. 1983 Oct;7(9):545-8.
32. Yamamoto M. Basic technique for building porcelain layers. In: Yamamoto M, editor. Color atlas basic technique for metal ceramic: An introduction to ceramic technique. Tokyo: Quintessence; 1990. p. 13-56.
33. Hobo S, Shillingburg HT, Jr. Porcelain fused to metal: tooth preparation and coping design. J Prosthet Dent. 1973 Jul;30(1):28-36.
34. Martignoni M, Schonenberger A. Crown contour and the marginal seal. In: Martignoni M, Schonenberger A, editors. Precision fixed prosthodontics: Clinical and laboratory aspects. Chicago: Quintessence; 1990. p. 49-59.
35. Martignoni M, Schonenberger A. Application of the porcelain veneer. In: Martignoni M, Schonenberger A, editors. Precision fixed prosthodontics: Clinical and laboratory aspects. Chicago: Quintessence; 1990. p. 383-4.
36. McLean JW. The cast metal-ceramic crown. The science and art of dental ceramics volume II: Bridge design and laboratory procedures in dental ceramics. Chicago: Quintessence; 1980. p. 189-209.
37. Straussberg G, Katz G, Kuwata M. Design of gold supporting structures for fused porcelain restorations. J Prosthet Dent. 1966 Sep-Oct;16(5):928-36.

38. Miller A, Long J, Miller B, Cole J. Comparison of the fracture strengths of ceramometal crowns versus several all-ceramic crowns. J Prosthet Dent. 1992 Jul;68(1):38-41.
39. Naylor WP. Casting alloys for bonding to dental porcelain. In: Naylor WP, editor. Introduction to metal ceramic technology. Chicago: Quintessence; 1992. p. 27-41.
40. Anusavice KJ. Dental ceramics. In: Anusavice KJ, editor. Phillips's science of dental materials. 11 th ed. St. Louis: Saunders; 2003. p. 655-719.
41. Denry IL. Ceramics. In: Craig RG, Powers JM, editors. Restorative dental materials. 11 th ed. St. Louis: Mosby; 2002. p. 551-74.
42. Denry IL, Laub LW. Metal-ceramic restorations. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. 3 rd ed. St.Louis: Mosby; 2001. p. 614-7.
43. Craig RG, Powers JM, Wataha JC. Dental ceramics. In: Craig RG, Powers JM, Wataha JC, editors. Dental materials: properties and manipulation. eighth ed. St. Louis: Mosby; 2005. p. 296-305.
44. Noort RV. Dental ceramics. In: Noort RV, editor. Introduction to dental materials. 2 nd ed. Edinburgh: Mosby; 2002. p. 231-46.
45. Brantley WA, Laub LW. Metal-ceramic restorations. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. 3 rd ed. St.Louis: Mosby; 2001. p. 617-20.
46. Barghi N, Lorenzana RE. Optimum thickness of opaque and body porcelain. J Prosthet Dent. 1982 Oct;48(4):429-31.
47. O'Brien WJ, Boenke KM, Groh CL. Evaluation of some properties of an opaque porcelain fired simultaneously with the body porcelain. J Prosthet Dent. 1994 Oct;72(4):414-9.
48. Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. Metal -ceramic restorations. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. 3 rd ed. St.Louis: Mosby; 2001. p. 620-42.
49. Riley EJ. Ceramo-metal restoration. State of the science. Dent Clin North Am. 1977 Oct;21(4):669-82.
50. Koseyan GK, Biswas CP. A study of ceramic-metal restoration process. J Prosthet Dent. 1976 Dec;36(6):694-8.
51. Wataha JC. Nature of metals and alloys. In: Craig RG, Powers JM, editors. Restorative dental materials. 11 th ed. St.Louis: Mosby; 2002. p. 163-83.



52. Wataha JC. Alloys for prosthodontic restorations. J Prosthet Dent. 2002 Apr;87(4):351-63.
53. Wataha JC, Messer RL. Casting alloys. Dent Clin North Am. 2004 Apr;48(2):vii-viii, 499-512.
54. Revised ANSI/ADA specification no. 5 for dental casting alloys. Council on Dental Materials, Instruments, and Equipment. J Am Dent Assoc. 1989 Mar;118(3):379.
55. Anusavice KJ, Cascone P. Dental casting and soldering alloys. In: Anusavice KJ, editor. Phillips' science of dental materials. 11 th ed. St. Louis: Saunders; 2003. p. 570-4.
56. Anusavice KJ. Noble metal alloys for metal-ceramic restorations. Dent Clin North Am. 1985 Oct;29(4):789-803.
57. Craig RG, Powers JM, Wataha JC. Dental casting alloys and solders. In: Craig RG, Powers JM, Wataha JC, editors. Dental materials: Properties and manipulation. 8 th ed. St. Louis: Mosby; 2004. p. 234-54.
58. Baran GR. Cast and wrought base metal alloys. In: Craig RG, Powers JM, editors. Restorative dental materials. 11 th ed. St. Louis: Mosby; 2002. p. 479-513.
59. Huang HH, Lin MC, Lee TH, Yang HW, Chen FL, Wu SC, et al. Effect of chemical composition of Ni-Cr dental casting alloys on the bonding characterization between porcelain and metal. J Oral Rehabil. 2005 Mar;32(3):206-12.
60. Wataha JC, Lockwood PE. Release of elements from dental casting alloys into cell-culture medium over 10 months. Dent Mater. 1998 Mar;14(2):158-63.
61. Lubovich RP, Goodkind RJ. Bond strength studies of precious, semiprecious, and nonprecious ceramic-metal alloys with two porcelains. J Prosthet Dent. 1977 Mar;37(3):288-99.
62. Noort RV. Metal-bonded ceramics. In: Noort RV, editor. Introduction to dental materials. 2 nd ed. Edinburgh: Mosby; 2002. p. 247-56.
63. Shell JS, Nielsen JP. Study of the bond between gold alloys and porcelain. J Dent Res. 1962 Nov-Dec;41:1424-37.
64. Yamamoto M. Introduction to metal ceramics. In: Yamamoto M, editor. Color atlas basic technique for metal ceramics: An introduction to ceramic technique. Tokyo: Quintessence; 1990. p. 9-12.

65. Miller L. A clinician's interpretation of tooth preparation and the design of metal substructures for metal-ceramic restorations. In: McLean JW, editor. Dental ceramics proceedings of the first international symposium on ceramics. Chicago: Quintessence; 1983. p. 153-206.
66. Kostka CM. A review of ceramo-metal substructure design principles. Quintessence Dent Technol. 1985 Feb;9(2):109-11.
67. Wohrle PS. Principles of aesthetic implant dentistry. In: Babbush CA, editor. Dental implants: The art and science. Philadelphia: W.B.Saunders; 2001. p. 371-85.
68. Misch CE. Prosthetic options in implant dentistry. In: Misch CE, editor. Dental implant prosthetics. St.Louis: Mosby; 2005. p. 43-52.
69. Lund PS, Barber BA. The effect of porcelain veneer extension on strength of metal ceramic crowns. Int J Prosthodont. 1992 May-Jun;5(3):237-43.
70. Walton TR, O'Brien WJ. Thermal stress failure of porcelain bonded to a palladium-silver alloy. J Dent Res. 1985 Mar;64(3):476-80.
71. Nielsen JP, Tuccillo JJ. Calculation of interfacial stress in dental porcelain bonded to gold alloy substrate. J Dent Res. 1972 Jul-Aug;51(4):1043-7.
72. Marker JC, Goodkind RJ, Gerberich WW. The compressive strength of nonprecious versus precious ceramometal restorations with various frame designs. J Prosthet Dent. 1986 May;55(5):560-7.
73. Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. Principles of tooth preparation. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. 3 rd ed. St. Louis: Mosby; 2001. p. 166-201.
74. Burke FJ, Grey NJ. Repair of fractured porcelain units: alternative approaches. Br Dent J. 1994 Apr 9;176(7):251-6.
75. Burke FJ. Fracture resistance of teeth restored with dentin-bonded crowns: the effect of increased tooth preparation. Quintessence Int. 1996 Feb;27(2):115-21.
76. Abu-Hassan MI, Abu-Hammad OA, Harrison A. Strains and tensile stress distribution in loaded disc-shaped ceramic specimens. An FEA study. J Oral Rehabil. 1998 Jul;25(7):490-5.
77. Bertolotti RL, Lacy AM, Watanabe LG. Adhesive monomers for porcelain repair. Int J Prosthodont. 1989 Sep-Oct;2(5):483-9.
78. Warpeha WS, Jr., Goodkind RJ. Design and technique variables affecting fracture resistance of metal-ceramic restorations. J Prosthet Dent. 1976 Mar;35(3):291-8.

79. Woods JA, Cavazos E, Jr. Effects of porcelain-metal junction angulation on porcelain fracture. J Prosthet Dent. 1985 Oct;54(4):501-3.
80. O'Boyle KH, Norling BK, Cagna DR, Phoenix RD. An investigation of new metal framework design for metal ceramic restorations. J Prosthet Dent. 1997 Sep;78(3):295-301.
81. Ulusoy M, Toksavul S. Fracture resistance of five different metal framework designs for metal-ceramic restorations. Int J Prosthodont. 2002 Nov-Dec;15(6):571-4.
82. Probst L. Compressive strength of two modern all-ceramic crowns. Int J Prosthodont. 1992 Sep-Oct;5(5):409-14.
83. Castellani D, Baccetti T, Giovannoni A, Bernardini UD. Resistance to fracture of metal ceramic and all-ceramic crowns. Int J Prosthodont. 1994 Mar-Apr;7(2):149-54.
84. Strub JR, Beschnidt SM. Fracture strength of 5 different all-ceramic crown systems. Int J Prosthodont. 1998 Nov-Dec;11(6):602-9.
85. Ernekli C, Odman P, Ortengren U, Rasmusson L. Tolerance test of five different types of crowns on single-tooth implants. Int J Prosthodont. 1998 May-Jun;11(3):233-9.
86. Yildirim M, Fischer H, Marx R, Edelhoff D. In vivo fracture resistance of implant-supported all-ceramic restorations. J Prosthet Dent. 2003 Oct;90(4):325-31.
87. Torrado E, Ercoli C, Al Mardini M, Graser GN, Tallents RH, Cordaro L. A comparison of the porcelain fracture resistance of screw-retained and cement-retained implant-supported metal-ceramic crowns. J Prosthet Dent. 2004 Jun;91(6):532-7.
88. Scherrer SS, de Rijk WG. The fracture resistance of all-ceramic crowns on supporting structures with different elastic moduli. Int J Prosthodont. 1993 Sep-Oct;6(5):462-7.
89. Webber B, McDonald A, Knowles J. An in vitro study of the compressive load at fracture of Procera AllCeram crowns with varying thickness of veneer porcelain. J Prosthet Dent. 2003 Feb;89(2):154-60.
90. Harrington Z, McDonald A, Knowles J. An in vitro study to investigate the load at fracture of Procera AllCeram crowns with various thickness of occlusal veneer porcelain. Int J Prosthodont. 2003 Jan-Feb;16(1):54-8.
91. Tsai YL, Petsche PE, Anusavice KJ, Yang MC. Influence of glass-ceramic thickness on Hertzian and bulk fracture mechanisms. Int J Prosthodont. 1998 Jan-Feb;11(1):27-32.
92. Dupont WD, Plummer WD. PS power and sample size program [program]. version 2.1.30 , February 2003; 1997. Available from: <http://www.mc.vanderbilt.edu/prevmed/ps/index.htm>

93. Ash MM, Nelson SJ. Introduction to dental anatomy. In: Ash MM, Nelson SJ, editors. Wheeler's dental anatomy, physiology, and occlusion. 8 th ed. Philadelphia: Saunders; 2003. p. 18.
94. eFunda engineering fundamentals. Properties of common solid materials [online]. 2006. Available from:  
[http://www.efunda.com/materials/common\\_matl/Common\\_Matl.cfm?MatlPhase=Solid&MatlProp=Mechanical#Mechanical](http://www.efunda.com/materials/common_matl/Common_Matl.cfm?MatlPhase=Solid&MatlProp=Mechanical#Mechanical)
95. O'Brien WJ. Biomaterials properties database [online]. The University of Michigan-NIDR Materials Science Research Center,1997. Available from:  
[http://www.lib.umich.edu/dentlib/Dental\\_tables/intro.html](http://www.lib.umich.edu/dentlib/Dental_tables/intro.html)
96. Brantley WA, Laub LW. Framework desing and metal selection for metal-ceramic restorations. In: Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J, editors. Contemporary fixed prosthodontics. St.Louis: Mosby; 2001. p. 497-512.
97. ประทักษ์ โอประเสริฐสวัสดิ์ . Commom errors in clinical research. ใน: ประทักษ์ โอประเสริฐสวัสดิ์ ,บรรณาธิการ. วิจัยทางคลินิก: Clinical research. พิมพ์ครั้งที่ 1. หน่วยระบาศวิทยาศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี: บริษัท โฮลิสติก พับลิชซิ่ง จำกัด; 2538. p. 103-10.
98. สมรัตน์ เลิศมหาฤทธิ์ . สถิติในการวิจัย. ใน: ภิมย์ กมรัตน์กุลและคณะ ,บรรณาธิการ. หลักการทำให้วิจัยให้สำเร็จ. พิมพ์ครั้งที่ 3 . ศูนย์วิทยการวิจัยแพทยศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด; 2545. p. 99-124.
99. ทวีป กิตยาภรณ์. Sample size estimation. ใน: ประทักษ์ โอประเสริฐสวัสดิ์, บรรณาธิการ. วิจัยทางคลินิก: Clinical research. พิมพ์ครั้งที่ 1. หน่วยระบาศวิทยาศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี: บริษัท โฮลิสติก พับลิชซิ่ง จำกัด; 2538. p. 65-81.
100. เดิมศรี ชำนิจารกิจ . การทดสอบสมมติฐาน. ใน: เดิมศรี ชำนิจารกิจ, บรรณาธิการ. สถิติประยุกต์ทางการแพทย์. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2544. p. 145-84.
101. นัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์. Type I error, type II error และอำนาจการทดสอบ [online]. 2544. แหล่งที่มา: <http://www.watpon.com/Elearning/stat19.htm>
102. การทดสอบสมมติฐาน [online]. แหล่งที่มา :  
<http://elearning.utcc.ac.th/courseonline/wallop/stat/chapter%207.doc>
103. สมมติฐานและระดับนัยสำคัญ [online]. แหล่งที่มา: [www.udru.ac.th/~charoen/stat9.htm](http://www.udru.ac.th/~charoen/stat9.htm)

104. นัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์. ระดับนัยสำคัญ [online]. 2544. แหล่งที่มา:  
<http://www.watpon.com/Elearning/stat3.htm>
105. Yamamoto M. Marginal fit. In: Yamamoto M, editor. Metal-ceramics: Principles and methods of Makoto Yamamoto  
Chicago: Quintessence; 1985. p. 203-18.

ภาคผนวก

ภาคผนวกตาราง ก แสดงส่วนประกอบและคุณสมบัติของโลหะที่ใช้ในการทดลอง  
(4all<sup>®</sup>, Williams; Ivoclar Vivadent Inc, Amherst, USA)

4all <sup>®</sup>													
ส่วนประกอบ (Composition)	<table> <tr> <td>Ni</td> <td>61.4</td> <td>Cr</td> <td>25.7</td> </tr> <tr> <td>Mo</td> <td>11.0</td> <td>Al</td> <td>&lt; 1.0</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>1.5</td> <td>Mn</td> <td>&lt; 1.0</td> </tr> </table>	Ni	61.4	Cr	25.7	Mo	11.0	Al	< 1.0	Si	1.5	Mn	< 1.0
Ni	61.4	Cr	25.7										
Mo	11.0	Al	< 1.0										
Si	1.5	Mn	< 1.0										
ความแข็งชนิดวิกเคอร์ (Vickers Hardness)	235												
มอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity)	200,000 MPa												
กำลังแรงดึงครั้งสุดท้าย (Ultimate tensile strength)	720 MPa												
การยืด (Elongation)	12.0 %												
สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเมื่อถูกความร้อน (Coefficient of thermal expansion)													
25-500 °C	$13.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \text{m/m}$												
20-600 °C	$14.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1} \text{m/m}$												

ภาคผนวกตาราง ข แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อชิ้นงาน

4all <sup>®</sup>	
Burnout temperature	800-850 °C
ช่วงการหลอมเหลว (Melting range)	1260-1350 °C
อุณหภูมิในการหล่อ (Casting temperature)	1405-1465 °C

ภาคผนวกตาราง ค แสดงอุณหภูมิในการสร้างชั้นออกไซด์

4all <sup>®</sup>	
การออกซิไดซ์ (Oxidation)	950 °C
ระยะเวลาที่คงไว้ (Holding time)	1 นาที
สุญญากาศ (vacuum)	ไม่มี (No vacuum)

ภาคผนวกตาราง ง แสดงลักษณะของพอร์ซเลนที่ใช้ในการทดลอง (IPS d.SIGN<sup>®</sup>, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)

IPS d.SING	
ชนิดของเซรามิก (type of ceramic)	Glass-ceramic
ลักษณะของผลึก (crystal phases)	-ผลึกอะพาไทท์ (apatite crystal) ที่มีลักษณะเป็น predominantly needle-like fluorapatite -ผลึกลูไซท์ (leucite crystals)

ภาคผนวกตาราง จ แสดงส่วนประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพ (ISO 9693) ของพอร์ซเลน

IPS d.SING	Dentin, Deep dentin, Incisal	Opaquer pastes
ส่วนประกอบ มาตรฐาน (Standard- composition) โดยน้ำหนัก (in weight %)	SiO <sub>2</sub> 50.0-65.0    Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8.0-20.0 Na <sub>2</sub> O 4.0-12.0    K <sub>2</sub> O 7.0-13.0 CaO 0.2-6.0    P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0.2-5.0 F 0.3-3.0 + Addition agents (SrO, B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Li <sub>2</sub> O, CeO <sub>2</sub> , BaO, ZnO, TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> ) + pigments 0.0-3.0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8.0-12.0    K <sub>2</sub> O 5.0-10.0 Na <sub>2</sub> O 2.0-6.0    SiO <sub>2</sub> 30.0-40.0 ZrO <sub>2</sub> 15.0-40.0 + Addition agents (TiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , CeO <sub>2</sub> , BaO, B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + Glycol + Pigments 0.0-25.0
ความแข็งแรงดัด ขวาง (Flexural strength)	80 ± 25 MPa	>100 MPa
สภาพละลายได้ทาง เคมี (Chemical solubility)	< 100 µg/cm <sup>2</sup>	<100 µg/cm <sup>2</sup>
สัมประสิทธิ์การ ขยายตัวเมื่ออุณหภูมิ ร้อน (CTE) (25-500° C)	2 firings 12.0 (± 0.5) x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> m/m 4 firings 12.6 (± 0.5) x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> m/m	2 firings 13.6 (± 0.5) x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> m/m 4 firings 13.8 (± 0.5) x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> m/m
อุณหภูมิการแปลง (Transformation temperature)	510 ± 10° C	600 ± 10° C



ภาคผนวกตาราง จ แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาพอร์ซเลนชั้นต่างๆ

	การเผาชั้น โอเพก ครั้งที่ 1 และ 2 (1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> opaquer firing)	การเผาชั้นเนื้อ ฟันและปลายฟัน ครั้งแรก (1 <sup>st</sup> dentin & incisal firing)	การเผาเพื่อแก้ไข (Corrective firing) การเผาชั้นเนื้อฟัน และปลายฟันครั้งที่ สอง (2 <sup>nd</sup> dentin & incisal firing)	การเผาเคลือบ ผิวที่มีครีม เคลือบผิว (Glaze firing with glazing paste)
อุณหภูมิที่คงไว้ (Holding Temp)	900° C	870° C	870° C	830° C
อุณหภูมิสำรอง (Stand-by temperature)	403° C	403° C	403° C	403° C
เวลาที่ปิด (Closing time)	6 min.	4-6 min.	4 min.	4 min.
อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ครั้งที่ 2 (2 <sup>nd</sup> Temperature increase)	60° C	60° C	60° C	60° C
ระยะเวลาที่คงไว้ (Holding time)	1 min.	1 min.	1 min.	1-2 min.
2 <sup>nd</sup> Vacuum / on	450° C	450° C	450° C	450° C
2 <sup>nd</sup> Vacuum / off	899° C	869° C	869° C	829° C

ภาคผนวกตาราง ข แสดงการวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูลกลุ่มที่ 1-5

**One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test**

group			max.load (N)
group1-0.3/0.7	N		10
	Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	2396.2290
		Std. Deviation	580.30988
	Most Extreme Differences	Absolute	.184
		Positive	.148
		Negative	-.184
	Kolmogorov-Smirnov Z		.581
Asymp. Sig. (2-tailed)		.889	
group2-0.3/1.35	N		10
	Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	2644.9310
		Std. Deviation	373.04977
	Most Extreme Differences	Absolute	.134
		Positive	.117
		Negative	-.134
	Kolmogorov-Smirnov Z		.424
Asymp. Sig. (2-tailed)		.994	
group3-0.3/2.0	N		10
	Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	2629.1910
		Std. Deviation	282.65847
	Most Extreme Differences	Absolute	.130
		Positive	.124
		Negative	-.130
	Kolmogorov-Smirnov Z		.411
Asymp. Sig. (2-tailed)		.996	
group4-0.3-2.65	N		10
	Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	2436.3210
		Std. Deviation	312.33963
	Most Extreme Differences	Absolute	.218
		Positive	.218
		Negative	-.153
	Kolmogorov-Smirnov Z		.688
Asymp. Sig. (2-tailed)		.731	
group5-0.3/3.3	N		10
	Normal Parameters <sup>a,b</sup>	Mean	2352.8220
		Std. Deviation	257.13364
	Most Extreme Differences	Absolute	.155
		Positive	.155
		Negative	-.131
	Kolmogorov-Smirnov Z		.492
Asymp. Sig. (2-tailed)		.969	

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ภาคผนวกตาราง ข แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลอวี (Levene's Test) ของกลุ่มที่ 1-5

#### Test of Homogeneity of Variances

max.load (N)

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1.779	4	45	.150

ภาคผนวกตาราง ฅ แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ในกรณีที่มีค่าความแปรปรวนของตัวอย่างเหมือนกันของกลุ่มที่ 1-5

#### ANOVA

max.load (N)

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	738519.6	4	184629.903	1.283	.291
Within Groups	6475457	45	143899.052		
Total	7213977	49			

ภาคผนวกตาราง ญ แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ด้วยการทดสอบแบบโรบัสต์ (Robust Test) ชนิดบราวน์-ฟอร์ซิติ (Brown-Forsythe) ของกลุ่มที่ 1-5

### Oneway

#### Robust Tests of Equality of Means

max.load (N)

	Statistic <sup>a</sup>	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	1.283	4	30.442	.298

a. Asymptotically F distributed.

ภาคผนวกตาราง ๓ แสดงการวิเคราะห์การแจกแจงของข้อมูลกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

group				max.load (N)
group3-0.3/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	2629.1910
			Std. Deviation	282.65847
	Most Extreme Differences		Absolute	.130
			Positive	.124
			Negative	-.130
	Kolmogorov-Smirnov Z			.411
Asymp. Sig. (2-tailed)			.996	
group6-0.1/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	1551.1390
			Std. Deviation	682.91982
	Most Extreme Differences		Absolute	.256
			Positive	.162
			Negative	-.256
	Kolmogorov-Smirnov Z			.808
Asymp. Sig. (2-tailed)			.531	
group7-0.2/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	2189.7090
			Std. Deviation	448.61771
	Most Extreme Differences		Absolute	.196
			Positive	.145
			Negative	-.196
	Kolmogorov-Smirnov Z			.621
Asymp. Sig. (2-tailed)			.835	
group8-0.4/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	2565.6090
			Std. Deviation	217.43594
	Most Extreme Differences		Absolute	.222
			Positive	.154
			Negative	-.222
	Kolmogorov-Smirnov Z			.703
Asymp. Sig. (2-tailed)			.707	
group9-0.7/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	2722.2540
			Std. Deviation	247.07644
	Most Extreme Differences		Absolute	.175
			Positive	.175
			Negative	-.144
	Kolmogorov-Smirnov Z			.553
Asymp. Sig. (2-tailed)			.920	
group10-1.0/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	2450.6010
			Std. Deviation	242.14715
	Most Extreme Differences		Absolute	.097
			Positive	.083
			Negative	-.097
	Kolmogorov-Smirnov Z			.308
Asymp. Sig. (2-tailed)			1.000	
group11-1.3/2.0	N			10
	Normal Parameters	a,b	Mean	2611.4180
			Std. Deviation	333.14968
	Most Extreme Differences		Absolute	.262
			Positive	.262
			Negative	-.138
	Kolmogorov-Smirnov Z			.828
Asymp. Sig. (2-tailed)			.500	

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

ภาคผนวกตาราง ฎ แสดงการทดสอบความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of Variances) ด้วยการทดสอบแบบเลอวีน์ (Levene's Test) ของกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11

#### Test of Homogeneity of Variances

max.load (N)			
Levene Statistic	df1	df2	Sig.
3.701	6	63	.003

ภาคผนวกตาราง ฐ แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ในกรณีที่ มีค่าความแปรปรวนเหมือนกันของกลุ่มที่ 3 และกลุ่มที่ 6-11

#### ANOVA

max.load (N)					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	9949317	6	1658219.562	11.319	.000
Within Groups	9229340	63	146497.463		
Total	19178658	69			

ภาคผนวกตาราง ท แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) ด้วยการ ทดสอบแบบ โรบัสต์ (Robust Test) ชนิดบราวน์-ฟอร์ซิติ (Brown-Forsythe) ของกลุ่มที่ 3 และ กลุ่มที่ 6-11

### Oneway

#### Robust Tests of Equality of Means

max.load (N)				
	Statistic <sup>a</sup>	df1	df2	Sig.
Brown-Forsythe	11.319	6	33.079	.000

a. Asymptotically F distributed.

ภาคผนวกตาราง ๓ แสดงการทดสอบด้วยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนแบบแทมเฮน กลุ่มที่ 3 และ 6-11

## Post Hoc Tests

### Multiple Comparisons

Dependent Variable: max.load (N)

Tamhane

(I) group	(J) group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
group3-0.3/2.0	group6-0.1/2.0	1078.05200*	233.72533	.012	185.1445	1970.9595
	group7-0.2/2.0	439.48200	167.67637	.334	-168.8168	1047.7808
	group8-0.4/2.0	63.58200	112.77154	1.000	-337.6795	464.8435
	group9-0.7/2.0	-93.06300	118.71924	1.000	-512.2765	326.1505
	group10-1.0/2.0	178.59000	117.69921	.964	-237.3963	594.5763
	group11-1.3/2.0	17.77300	138.16096	1.000	-470.7630	506.3090
group6-0.1/2.0	group3-0.3/2.0	-1078.0520*	233.72533	.012	-1970.9595	-185.1445
	group7-0.2/2.0	-638.57000	258.38679	.418	-1571.6223	294.4823
	group8-0.4/2.0	-1014.4700*	226.64022	.020	-1904.7800	-124.1600
	group9-0.7/2.0	-1171.1150*	229.65763	.007	-2061.8653	-280.3647
	group10-1.0/2.0	-899.46200*	229.13200	.047	-1790.0603	-8.8637
	group11-1.3/2.0	-1060.2790*	240.28487	.014	-1959.8684	-160.6896
group7-0.2/2.0	group3-0.3/2.0	-439.48200	167.67637	.334	-1047.7808	168.8168
	group6-0.1/2.0	638.57000	258.38679	.418	-294.4823	1571.6223
	group8-0.4/2.0	-375.90000	157.65032	.506	-966.6015	214.8015
	group9-0.7/2.0	-532.54500	161.95821	.107	-1129.6781	64.5881
	group10-1.0/2.0	-260.89200	161.21200	.944	-856.7765	334.9925
	group11-1.3/2.0	-421.70900	176.70500	.463	-1052.2488	208.8308
group8-0.4/2.0	group3-0.3/2.0	-63.58200	112.77154	1.000	-464.8435	337.6795
	group6-0.1/2.0	1014.4700*	226.64022	.020	124.1600	1904.7800
	group7-0.2/2.0	375.90000	157.65032	.506	-214.8015	966.6015
	group9-0.7/2.0	-156.64500	104.07937	.967	-524.0622	210.7722
	group10-1.0/2.0	115.00800	102.91435	.999	-248.0278	478.0438
	group11-1.3/2.0	-45.80900	125.80425	1.000	-500.4160	408.7980
group9-0.7/2.0	group3-0.3/2.0	93.06300	118.71924	1.000	-326.1505	512.2765
	group6-0.1/2.0	1171.1150*	229.65763	.007	280.3647	2061.8653
	group7-0.2/2.0	532.54500	161.95821	.107	-64.5881	1129.6781
	group8-0.4/2.0	156.64500	104.07937	.967	-210.7722	524.0622
	group10-1.0/2.0	271.65300	109.39927	.388	-113.5801	656.8861
	group11-1.3/2.0	110.83600	131.16229	1.000	-357.2452	578.9172
group10-1.0/2.0	group3-0.3/2.0	-178.59000	117.69921	.964	-594.5763	237.3963
	group6-0.1/2.0	899.46200*	229.13200	.047	8.8637	1790.0603
	group7-0.2/2.0	260.89200	161.21200	.944	-334.9925	856.7765
	group8-0.4/2.0	-115.00800	102.91435	.999	-478.0438	248.0278
	group9-0.7/2.0	-271.65300	109.39927	.388	-656.8861	113.5801
	group11-1.3/2.0	-160.81700	130.23976	.996	-626.4244	304.7904
group11-1.3/2.0	group3-0.3/2.0	-17.77300	138.16096	1.000	-506.3090	470.7630
	group6-0.1/2.0	1060.2790*	240.28487	.014	160.6896	1959.8684
	group7-0.2/2.0	421.70900	176.70500	.463	-208.8308	1052.2488
	group8-0.4/2.0	45.80900	125.80425	1.000	-408.7980	500.4160
	group9-0.7/2.0	-110.83600	131.16229	1.000	-578.9172	357.2452
	group10-1.0/2.0	160.81700	130.23976	.996	-304.7904	626.4244

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

ภาคผนวกภาพ ๓ แสดงลักษณะการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างของกลุ่มต่างๆ



กลุ่มที่ 1



กลุ่มที่ 2

ภาคผนวกภาพ ๓ แสดงลักษณะการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)



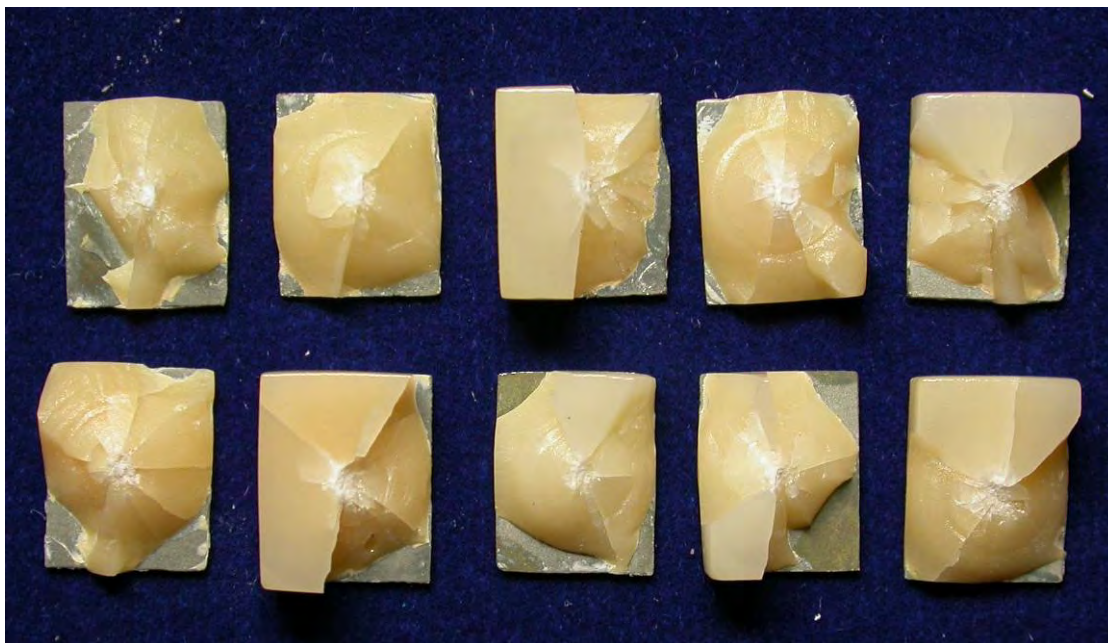
กลุ่มที่ 3



กลุ่มที่ 4



ภาคผนวกภาพ ๓ แสดงลักษณะการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)



กลุ่มที่ 5



กลุ่มที่ 6

ภาคผนวกภาพ ๓ แสดงลักษณะการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)



กลุ่มที่ 7



กลุ่มที่ 8

ภาคผนวกภาพ ๓ แสดงลักษณะการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)



กลุ่มที่ 9



กลุ่มที่ 10

ภาคผนวกภาพ ๓ แสดงลักษณะการแตกหักของพอร์ซเลนบนชิ้นงานตัวอย่างของกลุ่มต่างๆ (ต่อ)



กลุ่มที่ 11

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธิดารัตน์ อังวรารวงษ์ เกิดวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีทันตแพทยศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 1 คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2545 เข้ารับราชการตำแหน่งอาจารย์ ภาควิชาทันตกรรม ประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นเป็นเวลา 2 ปี หลังจากนั้นจึงลาศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาทันตกรรมประดิษฐ์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547 ปัจจุบันรับราชการตำแหน่งอาจารย์ สังกัดโรงพยาบาลทันตกรรม คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น