

ความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากลึก 3 วิธี



นาย กรเทพ สุขยุค

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

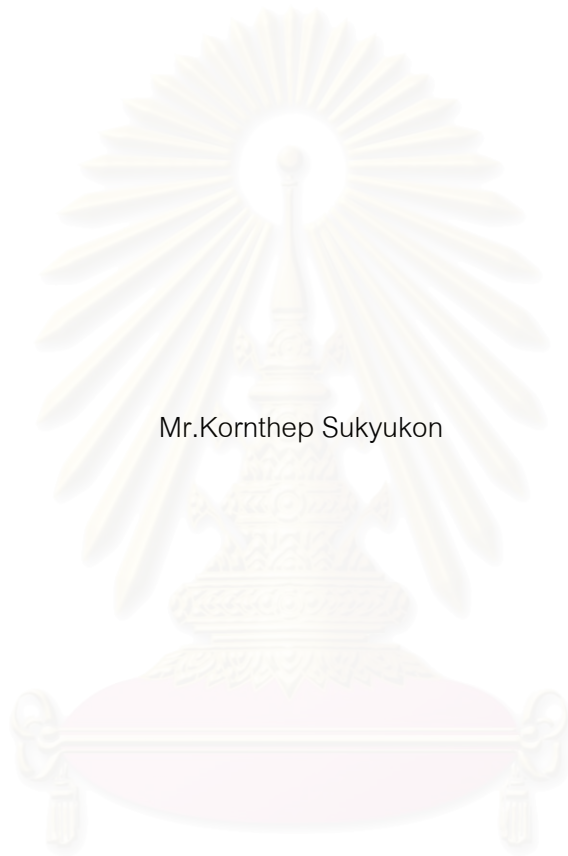
สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE ACCURACY OF THE MASTER CASTS FROM THREE DIFFERENT IMPLANT
IMPRESSION TECHNIQUES



Mr.Kornthep Sukyukon

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียม 3 วิธี

โดย

นาย กรเทพ สุขยุค

สาขาวิชา

ทันตกรรมประดิษฐ์

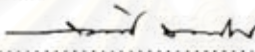
อาจารย์ที่ปรึกษา

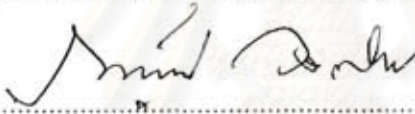
รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย

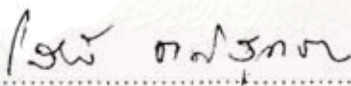
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

 คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง จิตติมา กุศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สรรพชัย นามะโน)

 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย)

 กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์กิตติคุณ ทันตแพทย์หญิง ไสริ ชาตสุทธิพันธ์)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ตระกล เมฆวนารชานานนท์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรเทพ สุขยุค : ความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียม 3 วิธี (THE ACCURACY OF THE MASTER CASTS FROM THREE DIFFERENT IMPLANT IMPRESSION TECHNIQUES)

อ.ที่ปรึกษา : รศ.ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย, 105 หน้า

วัตถุประสงค์ การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาวิธีพิมพ์รากเทียมที่มีความเที่ยงตรงสูงสุด โดยศึกษาจากความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียม 3 วิธี เมื่อเทียบกับแม่แบบ

วัสดุและวิธีการ แบบจำลองจำนวน 30 ชิ้น ถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม โดยใช้วิธีพิมพ์ คือ กลุ่มที่ 1 วิธีพิมพ์โดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ กลุ่มที่ 2 วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดร่วม และกลุ่มที่ 3 วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดและทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์ ทดลองโดยสร้างแม่แบบที่มีรากเทียมฝังอยู่บนฐานโลหะสี่เหลี่ยม 2 ตัว ตัวหลักแต่ละตัวที่ติดอยู่กับรากเทียมจะทำเครื่องหมายที่ขอบด้านบนเพื่อเป็นจุดอ้างอิง 3 จุด รวมเป็น 6 จุด ทำการพิมพ์ด้วยวัสดุพิมพ์ซิลิโคน แอดดิชันแนล ด้วยวิธีต่างๆแล้วนำไปเทแบบจำลองด้วยปูนหินชนิดที่ 4 จากนั้นนำแบบจำลองเหล่านี้ไปวัดระยะทางของจุดอ้างอิงที่มีการเบี่ยงเบนไปเมื่อเทียบกับแม่แบบ โดยใช้เครื่อง measurement microscope ที่ระดับความละเอียด 1/1000 มิลลิเมตร ซึ่งวัดในรูปพิกัด (x,y,z) เพื่อศึกษาทิศทางการเบี่ยงเบน และใช้ทฤษฎี ปีทาгорัส เปลี่ยนพิกัดที่ได้เป็นระยะทางที่มีการเบี่ยงเบนไป แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมเอสพีเอสเอสเวอร์ชัน 10.5 ด้วยสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว และเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มโดยสถิติ Tamhane test ซึ่งแยกพิจารณาทีละจุดอ้างอิงทั้ง 6 จุด

ผลการศึกษา แบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์โดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ มีการเบี่ยงเบนไปจากแม่แบบน้อยกว่าวิธีพิมพ์วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดร่วม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้ง 6 จุด ($p = 0.001, 0.000, 0.000, 0.002, 0.003, 0.000$ ตามลำดับ) และน้อยกว่าวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดและทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์ ($p = 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000$ ตามลำดับ) ส่วนวิธีพิมพ์โดยตรงทั้งแบบที่ทำการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายถอดเข้ากับภาคพิมพ์นั้น แบบจำลองที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.446, 0.980, 0.212, 0.073, 0.108, 0.566$ ตามลำดับ)

สรุป วิธีพิมพ์โดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ จะให้แบบจำลองที่มีความเที่ยงตรงสูงสุด ส่วนวิธีพิมพ์โดยตรง การเชื่อมหรือไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายถอดนั้นไม่มีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลอง

คำสำคัญ: วิธีพิมพ์โดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ; รากเทียม; วิธีพิมพ์รากเทียม; ความเที่ยงตรง; ตัวต่อยอดถ่ายถอด

ภาควิชา..... ทันตกรรมประดิษฐ์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..... ทันตกรรมประดิษฐ์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4976101232; MAJOR PROSTHODONTICS

KEYWORD : CONVENTIONAL IMPRESSION TECHNIQUE, IMPLANT IMPRESSION, DIRECT TECHNIQUE, INDIRECT TECHNIQUE, SPLINT TRANSFER COPING

KORNTHAP SUKYUKON: THE ACCURACY OF THE MASTER CASTS FROM THREE DIFFERENT IMPLANT IMPRESSION TECHNIQUES. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PARNUPONG WONGTHAI. 105 pp.

Objective To investigate the accuracy of the master casts from three different implant impression techniques. The master casts were compared with the master model.

Materials and methods Thirty master casts were divided into 3 groups according to 3 impression techniques. Group 1 conventional impression technique, group 2 direct implant impression technique and group 3 direct splint implant impression technique. The master model composed of 2 implants embedded in rectangular metal base with 3 reference points on the shoulder of each abutment. The master model was duplicated by additional silicone with three impression techniques then the impressions were poured with type IV stone. The dimensional changes of master casts were measured by measurement microscope at resolution 1/1000 mm. The results shown in coordinate point (x,y,z) for studying the direction of errors then changed the coordinate points to true dimensional changes by Pythagoras' theory. Each reference point were analyzed by One-way ANOVA and Tamhane Test.

Result The master casts from The conventional impression technique had significantly less dimensional changes than The direct impression technique in all reference points ($p=0.001, 0.000, 0.000, 0.002, 0.003, 0.000$ respectively) and the direct splint impression technique ($p=0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000$). The master casts from the direct impression technique was not significantly different from the direct splint impression technique ($p=0.446, 0.980, 0.212, 0.073, 0.108, 0.566$).

Conclusion The conventional impression technique had the most accuracy and splint transfer coping did not affect the accuracy of the master casts.

Department of Prosthodontic
Field of study Prosthodontic
Academic year 2007

Student's signature.....*Korathap Sukyukon*
Advisor's signature.....*Parnpong Wongthai*
Coadvisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย ที่
กรุณาให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย ตลอดจนกรุณาตรวจแก้ไข
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นต่องานวิจัย และแก้ไข
วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาทางสถิติ อาจารย์ ไพพรรณ วิทยานนท์ ที่ช่วยให้
ความรู้ทางด้านสถิติ รวมทั้งคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบริษัทสามเอ็ม ทีเอ็๋เพื่อ วัสดุพิมพ์ปากที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในศูนย์ทันตวัสดุทุกท่านที่เอื้ออำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลา
เวลาการทำงานวิจัย

สุดท้ายผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัย
และขอกราบขอบพระคุณผู้มีพระคุณทั้งหมดที่ไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ ที่ช่วยเหลือและเป็น
กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์การวิจัย.....	6
	ขอบเขตการวิจัย	6
	ข้อจำกัดของการวิจัย.....	7
	คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	7
	คำถามการวิจัย.....	8
	สมมติฐานการวิจัย.....	8
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
	การออกแบบการวิจัย.....	8
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
	ความหมายของรากเทียม.....	9
	ปัจจัยที่มีผลต่อความแนบสนิทย่างที่เที่ยงตรงของโครงโลหะฟันปลอม.....	12
	การยึดติดของฟันปลอมบนรากเทียม.....	19
	วัสดุพิมพ์ปาก.....	21
	ถาดพิมพ์ปาก.....	23
	กระบวนการการพิมพ์ปาก.....	25
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
	กระบวนการวัด.....	31
3	วิธีดำเนินการการวิจัย.....	37
	ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	37
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	38

บทที่	หน้า
	วิธีการทดลอง..... 38
	วิธีการสร้างแม่แบบที่ใช้เป็นกลุ่มควบคุม..... 41
	วิธีการสร้างภาคพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล..... 44
	วิธีการพิมพ์ปากด้วยวิธีต่าง..... 45
	วิธีการเทแบบจำลอง..... 47
	วิธีการเตรียมชิ้นงานก่อนทำการวัดผล..... 48
	กระบวนการวัดผลและแปรผล..... 50
	การวิเคราะห์ข้อมูล..... 61
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล..... 62
	กราฟทิศทางการกระจายของข้อมูล..... 63
	ระยะทางความแตกต่างระหว่างแม่แบบ กับแบบจำลอง และผลสถิติ..... 69
5	อภิปรายผลการวิจัย..... 78
	วิจารณ์วัตถุประสงค์อุปกรณ์และวิธีการทดลอง..... 78
	อภิปรายผลการวิจัย..... 80
	ข้อเสนอแนะ..... 85
6	สรุปผลการวิจัย..... 86
	รายการอ้างอิง..... 87
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 105

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงถึงพิกัด x กลุ่มวิธีพิมพ์ปากระดับตัวหลักโดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด.....	63
ตารางที่ 2 แสดงถึงพิกัด y กลุ่มวิธีพิมพ์ปากระดับตัวหลักโดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด.....	64
ตารางที่ 3 แสดงถึงพิกัด z กลุ่มวิธีพิมพ์ปากระดับตัวหลักโดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด.....	64
ตารางที่ 4 แสดงถึงพิกัด x กลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วม.....	65
ตารางที่ 5 แสดงถึงพิกัด y กลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วม.....	66
ตารางที่ 6 แสดงถึงพิกัด z กลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วม.....	66
ตารางที่ 7 แสดงถึงพิกัด x กลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรง และทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์.....	67
ตารางที่ 8 แสดงถึงพิกัด y กลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรง และทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์.....	68
ตารางที่ 9 แสดงถึงพิกัด z กลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรง และทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์.....	68
ตารางที่ 10 แสดงถึงค่า $xg_n - xcon$ คำนวณต่อจากตาราง 1.....	70
ตารางที่ 11 แสดงถึงค่า $(xg_n - xcon)^2$	70
ตารางที่ 12 แสดงถึงค่า $yg_n - ycon$ คำนวณต่อจากตาราง 2.....	71
ตารางที่ 13 แสดงถึงค่า $(yg_n - ycon)^2$	71
ตารางที่ 14 แสดงถึงค่า $zg_n - zcon$ คำนวณต่อจากตาราง 3.....	71
ตารางที่ 15 แสดงถึงค่า $(zg_n - zcon)^2$	72
ตารางที่ 16 แสดงถึงค่า $(x_n - xcon)^2 + (y_n - ycon)^2 + (z_n - zcon)^2$	72
ตารางที่ 17 แสดงถึงค่า $\sqrt{(x_n - xcon)^2 + (y_n - ycon)^2 + (z_n - zcon)^2}$ ของกลุ่มที่ 1.....	72
ตารางที่ 18 แสดงถึงค่า $\sqrt{(x_n - xcon)^2 + (y_n - ycon)^2 + (z_n - zcon)^2}$ ของกลุ่มที่ 2.....	73
ตารางที่ 19 แสดงถึงค่า $\sqrt{(x_n - xcon)^2 + (y_n - ycon)^2 + (z_n - zcon)^2}$ ของกลุ่มที่ 3.....	73
ตารางที่ 20 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละจุดอ้างอิงของแต่ละวิธีพิมพ์.....	74
ตารางที่ 21 แสดงการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน.....	75
ตารางที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้สถิติ One-way ANOVA.....	75
ตารางที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้สถิติ Tamhane.....	76

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ	
ภาพที่ 1 Absolute systems.....	32
ภาพที่ 2 Relative system.....	32
ภาพที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน.....	33
ภาพที่ 4 แสดงระยะห่างระหว่างรากเทียม.....	34
ภาพที่ 5 จุดพิกัดแสดงตำแหน่งรากเทียม และมุมเอียง.....	34
ภาพที่ 6 แสดงขนาดของวัตถุ.....	34
ภาพที่ 7 แสดงจุดอ้างอิงต่างๆ.....	35
ภาพที่ 8 แสดงผลจากทิศทางการมอง.....	35
ภาพที่ 9 แสดงลักษณะแม่แบบ.....	39
ภาพที่ 10 แสดงโครงร่างและจุดต่างๆบนแม่แบบ.....	39
ภาพที่ 11 แสดงการวัดระยะที่มีการเบี่ยงเบนไปของแบบจำลองจากแม่แบบ.....	41
ภาพที่ 12 แสดงฐานโลหะของแม่แบบ.....	42
ภาพที่ 13 แสดงแม่แบบ.....	42
ภาพที่ 14 แสดงรอยบาทที่ใช้เป็นเครื่องหมายบนตัวหลัก.....	42
ภาพที่ 15 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope ในระนาบ xy.....	43
ภาพที่ 16 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope ในระนาบ xz.....	43
ภาพที่ 17 แสดงรอยต่อระหว่างส่วนประกอบต่างๆ.....	44
ภาพที่ 18 แสดงภาพพิมพ์ชนิดเจาะรู.....	45
ภาพที่ 19 แสดงวัสดุพิมพ์.....	45
ภาพที่ 20 แสดงขั้นตอนการพิมพ์โดยตรงแบบไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด.....	46
ภาพที่ 21 แสดงขั้นตอนการพิมพ์โดยตรงแบบเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด.....	47
ภาพที่ 22 เครื่องผสมปูนและเครื่องสั่นสะเทือน.....	48
ภาพที่ 23 แสดงแบบจำลองที่ได้จากแต่ละวิธีพิมพ์.....	48
ภาพที่ 24 แสดงแท่นวางแบบจำลองสำหรับต่อฐาน.....	48
ภาพที่ 25 แสดงการต่อฐานแบบจำลอง.....	49
ภาพที่ 26 แสดงการต่อฐานแบบจำลอง.....	49
ภาพที่ 27 แสดงการตรวจสอบความหนาของฐาน.....	50
ภาพที่ 28 เครื่อง measurement microscope.....	50
ภาพที่ 29 แสดงพิกัดต่างๆบนแบบจำลอง.....	51

ภาพที่ 30 แสดงพิกัดในระนาบ xy.....	52
ภาพที่ 31 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope.....	52
ภาพที่ 32 เครื่องมือที่ใช้ในการวางแบบจะลงตะแคง.....	53
ภาพที่ 33 แสดงพิกัดในระนาบ xz.....	54
ภาพที่ 34 แสดงการหมุนในแต่ละแกน.....	54
ภาพที่ 35 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope.....	55
ภาพที่ 36 แสดงระยะที่มีการเบี่ยงเบนไป.....	57
ภาพที่ 37 แสดงจุดพิกัด 2 มิติ.....	58
ภาพที่ 38 แสดงจุดพิกัด 3 มิติ.....	58
ภาพที่ 39 กราฟแสดงจุดพิกัดทุกจุดบนตัวหลัก.....	60
ภาพที่ 40 แสดงจุดที่ใช้วัดปูนขยายตัว.....	60
ภาพที่ 41 แสดงพิกัดต่างๆ บนแบบจำลอง.....	62
ภาพที่ 42 กราฟแสดงจุดพิกัดของกลุ่มที่ 1.....	63
ภาพที่ 43 กราฟแสดงจุดพิกัดของกลุ่มที่ 2.....	65
ภาพที่ 44 กราฟแสดงจุดพิกัดของกลุ่มที่ 3.....	67
ภาพที่ 45 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม.....	69
ภาพที่ 46 แสดงระยะเบี่ยงเบนระหว่างแม่แบบและแบบจำลอง.....	69
ภาพที่ 47 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	74
ภาพที่ 48 แสดงพิกัดที่ใช้วัดการขยายตัวของปูน.....	77
ภาพที่ 49 แสดงทิศทางการขยายตัวของฐานปูนนี้ห่างจากตัวหลัก.....	82
ภาพที่ 50 แสดงการหมุนขยับของจุดรอยต่อ.....	85

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การให้การรักษาทางทันตกรรมคือการบูรณะฟันธรรมชาติ และอวัยวะในช่องปากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ไม่ว่าจะสาเหตุนั้นจะมาจากการเสื่อมสภาพตามธรรมชาติ ภาวะของโรค หรืออุบัติเหตุ ให้กลับมาสู่สภาวะปกติทั้งในด้าน รูปร่าง การทำหน้าที่ ความสบาย ความสวยงาม การพูดออกเสียง และสุขภาพช่องปาก (Misch, 2005) การที่จะได้มาซึ่งสภาพเหล่านี้ คือการที่สามารถนำตัวฟันปลอมที่มีขนาดเท่ากัน หรือเหมือนกับฟันที่สูญเสียไปของผู้ป่วยมาวางติดกลับเข้าตำแหน่งเดิม และผู้ป่วยสามารถใช้ฟันนั้นได้เหมือนฟันธรรมชาติที่สูญเสียไป ซึ่งวิธีการมีตั้งแต่การใช้ฟันหลักที่เหลือเป็นหลักยึดและรองรับแรงในการทำสะพานฟันติดแน่น การใช้ฟันและสันเหงือกเป็นหลักยึดและรองรับแรงในฟันปลอมบางส่วนชนิดถอดได้ รวมไปถึงการนำวัสดุที่เข้ากันได้อย่างเหมาะสมกับเนื้อเยื่ออ่อน และกระดูกมาฝังลงในกระดูกหรือฝังบนกระดูกใต้เหงือกในบริเวณที่สูญเสียฟันธรรมชาติไป เพื่อทำหน้าที่คล้ายกับรากฟัน หรือเป็นฐานในการยึดฟันปลอม เราเรียกรูปแบบนี้ว่าการฝังรากเทียม (วงศ์ไทย, 2539) และรากเทียมยังช่วยแบ่งเบาภาระในการรับแรงของฟันธรรมชาติที่เหลืออยู่ โดยการกระจายแรงที่เกิดโดยตรงสู่กระดูกขากรรไกร (วงศ์ไทย, 2542)

จากหลักฐานทางประวัติศาสตร์ของชนชาติจีนและอียิปต์โบราณ พบว่าทันตแพทย์มีความพยายามในการนำหินและงาช้างมาใส่ทดแทนฟันธรรมชาติที่หลุดไป (Lemons และ Natiella, 1986) ต่อมาในช่วง ค.ศ.1980 รากเทียมชนิดใต้เยื่อหุ้มกระดูกที่ทำจากโลหะผสมโคบอลต์ - โครเมียม - โมลิบดีนัม (Cobalt - Chromium - Molybdenum subperiosteal Implants) และรากเทียมลักษณะใบมีดที่ทำจากโลหะไททาเนียม (Titanium Blade implants) ได้รับความนิยมอย่างมากในสมัยนั้น แต่ผลการรักษายังไม่แน่นอนทำให้ไม่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางนัก จากบันทึกหลักฐานทางประวัติศาสตร์พบว่าการใช้รากเทียมในทางทันตกรรมมีมานานกว่า 100 ปีแล้ว แต่ไม่มีข้อกำหนดใดที่บ่งบอกว่าลักษณะเช่นใดที่ถือว่าการรักษาโดยรากเทียมประสบความสำเร็จ จนถึงปี ค.ศ.1978 ได้มีการประชุมเพื่อหาข้อกำหนดที่จะเป็นมาตรฐานที่บ่งบอกถึงความสำเร็จของการใช้รากเทียม (Harvard consensus development) โดยกำหนดว่าถ้าอัตราการอยู่รอดของรากเทียมในช่องปาก (survival rate) มีค่าประมาณ 75% ในระยะเวลาติดตามผล 5 ปี ถือว่าการใช้รากเทียมนั้นประสบความสำเร็จ ด้วยข้อกำหนดนี้พบว่าการใช้รากเทียมจากอดีตจนถึงปี ค.ศ.1970 มีอัตราความล้มเหลวถึง 50% จนกระทั่งในปี 1982 ภายหลังจากการประชุมเกี่ยวกับรากเทียม ที่เมืองโตรอนโต ประเทศแคนาดา ได้มีการนำเสนอผลการศึกษา

รากเทียมระบบ Branemark และแนวคิดเกี่ยวกับการยึดเกาะโดยตรงระหว่างรากเทียมและกระดูก (osseointegration) โดยเปลี่ยนมาใช้โลหะผสมไททาเนียมแทนการใช้เหล็กไว้สนิมร่วมกับเทคนิคการฝังรากเทียม แบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งก็มีรายงานความสำเร็จอยู่มากมาย ดังเช่น Adell และคณะ (Adell และคณะ, 1981) ได้ทำการศึกษาระยะยาวในการใช้งานรากเทียมระบบ Branemark พบว่าอัตราความสำเร็จในการฝังในขากรรไกรล่างมีมากกว่าในขากรรไกรบน โดยในระยะเวลา 1-4 ปีแรก มีอัตราความสำเร็จในขากรรไกรบนร้อยละ 88 และในขากรรไกรล่างร้อยละ 97 ส่วนในระยะเวลา 5-9 ปี อัตราความสำเร็จในขากรรไกรบนลดลงเป็นร้อยละ 81 และในขากรรไกรล่างร้อยละ 91 ส่วนสำหรับในช่วงเวลา 10-15 ปี อัตราความสำเร็จของขากรรไกรบนลดเหลือเพียงร้อยละ 48 และของขากรรไกรล่างร้อยละ 63 โดยมีปริมาณการละลายตัวของขอบกระดูกมีค่าเฉลี่ยใน 1 ปีแรก 1.2 มิลลิเมตร และภาวะแทรกซ้อนเกิดรูเปิดหนองทะลุกระดูก (fistular penetration) บ่อยครั้งมักเกิดในตำแหน่งรอยเชื่อมต่อบริเวณตัวหลักและรากเทียม ร้อยละ 1.5 ของจำนวนรากเทียมที่เกิดความล้มเหลวทั้งหมดหลังการใช้งาน ส่วน Albrektsson และคณะ (Albrektsson และคณะ, 1988) ทำการศึกษาการฝังรากเทียมระบบ Branemark จำนวน 8,139 ตัว โดยพบว่าในช่วง 5-8 ปี อัตราความสำเร็จในขากรรไกรบนของผู้ป่วยปกติมีค่าร้อยละ 84.9 ส่วนในขากรรไกรล่างร้อยละ 89.1

จากการศึกษาผลของการใช้รากเทียมที่มีการยึดเกาะโดยตรงกับกระดูก ในระยะยาวแสดงถึงรากเทียมสามารถนำมาเป็นทางเลือกหนึ่งในการรักษาผู้ป่วยที่สูญเสียฟันได้ ปัจจัยที่มีส่วนสำคัญในการเกิดการยึดเกาะโดยตรงระหว่างรากเทียมและกระดูกได้แก่ ลักษณะของบริเวณกระดูกที่รองรับรากเทียม กระบวนการผ่าตัด สภาพการรับแรง การเข้ากันได้ของวัสดุกับร่างกาย การออกแบบรูปร่างรากเทียม และลักษณะพื้นผิวของรากเทียม ซึ่งการควบคุมแรงลงสู่รากเทียมนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างและการออกแบบ และความแนบสนิทของตัวฟันปลอมกับรากเทียม (Patrick, 1987) การควบคุมแรงจากการบดเคี้ยวบนฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมนั้นจำเป็นต่อการคงสภาพการยึดติดระหว่างรากเทียมกับกระดูก (Branemark, 1983)

การศึกษาเกี่ยวกับ ความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง (passive fit) และผลที่เกิดจากการที่ฟันปลอมปราศจาก ความแนบสนิทนี้ (Chee และคณะ, 1999; Hebel และ Gajjar, 1997; Kunavisarut และคณะ, 2002; Michalakis, Hirayama และ Garefis, 2003; Wee, Aquilino และ Schneider, 1999) มีอยู่มามายแสดงสรุปผลไปได้หลายแนวทาง จนกระทั่งปัจจุบันผลของความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง ต่อความสำเร็จในกระบวนการยึดติดระหว่างรากเทียมกับกระดูกก็ยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่นอนได้ มีนักวิจัยหลายคนที่แนะนำว่า ความแนบสนิทนี้ มีความจำเป็นกับความสำเร็จในระยะยาวของการรักษาด้วยรากเทียม (Jemt และ Lekholm, 1998; Jemt และ Lie, 1995; Millington และ Leung, 1995; Riedy, Lang และ Lang, 1997) แต่ใน

ปัจจุบันตัวอย่างกระบวนการทำฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมให้มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงจริง ยังไม่สามารถทำได้ (Kunavisarut และคณะ, 2002) เพราะความคลาดเคลื่อนในการทำโครงฟันปลอมเกิดขึ้นในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การพิมพ์ปาก การเทแบบหล่อ การเหียงโครง ไปจนถึงการใส่ฟันปลอม (Wee และคณะ, 1999) ทำให้มีช่องว่างหลายขนาดระหว่างรอยต่อต่างๆ สามารถพบได้ ซึ่งแสดงถึงความไม่แนบสนิทระหว่างชิ้นฟันปลอมกับตัวหลักรากเทียม (Cheshire และ Hobkirk, 1996)

การติดตามผลในระยะยาวของฟันปลอมร่วมกับรากเทียมชี้ให้เห็นว่ามี อาการแทรกซ้อนหลายอย่างเกิดขึ้นหลังจากใส่ฟันปลอมไป ซึ่งอาการแทรกซ้อนเหล่านี้ได้แก่ ส่วนประกอบของรากเทียมหัก โครงฟันปลอมหัก สกรูยึดตัวหลัก (abutment screw) และ สกรูยึดฟันปลอม (prosthetic screw) หลวม การสูญเสียขอบกระดูก ไปจนถึงการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างรากเทียมกับกระดูก Kallus และ Bessing (Kallus และ Bessing, 1994) พบว่ามีผู้ป่วยเป็นจำนวนมากที่สกรูหลวมและฟันปลอมไม่แนบสนิท โดยงานวิจัยเหล่านี้สรุปว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างอาการแทรกซ้อน เช่น สกรูหลวม กับความแนบสนิทของฟันปลอม แต่ก็มีบางรายงานที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่าง ความไม่แนบสนิท (misfit) กับการสูญเสียกระดูกรอบๆ รากเทียม (Carr, Gerard และ Larsen, 1996) Jemt และ Book (Jemt และ Book, 1996) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความไม่แนบสนิทของฟันปลอม กับการสูญเสียขอบกระดูกในรากเทียมที่ฝังในขากรรไกรบน การศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบย้อนหลัง โดยพบว่าไม่มีฟันปลอมที่มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง และไม่พบการสูญเสียกระดูกในช่วง 5 ปีที่ทำการศึกษา ข้อสรุปที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าต้องมีช่วงของความไม่แนบสนิทของรอยต่อระหว่างตัวหลักกับรากเทียม โดยรากเทียมที่มีการยึดติดกับกระดูกสามารถคงอยู่และมีเสถียรภาพในระยะยาว ทฤษฎีนี้ได้รับการสนับสนุนจาก Smedberg และคณะ (Smedberg และคณะ, 1996) โดยพบว่า ฟันปลอมที่ในคลินิกให้ความแนบสนิทอย่างดีนั้นจริงๆ แล้วยังมีความไม่แนบสนิทอยู่ แต่ก็ไม่พบการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างรากเทียมและกระดูก ในทางคลินิกเป็นการยากที่จะตรวจพบช่องว่างที่มีขนาดน้อยกว่า 60 ไมโครเมตร

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า ความไม่แนบสนิทของชิ้นฟันปลอมอาจจะไม่ได้มีผลกับการยึดติดระหว่างรากเทียมกับกระดูก แต่ความไม่แนบสนิทจะเพิ่มอุบัติการณ์ของส่วนประกอบของรากเทียมหลวม หรือแตกหัก (Kohavi, 1993) สาเหตุของความล้มเหลว และสกรูหลวมนั้นมีหลายสาเหตุร่วมกัน แต่ความไม่แนบสนิทเป็นส่วนสำคัญในการทำให้เกิดสกรูหลวมหรือหักในบริเวณที่เชื่อมต่อกับรากเทียม (Kallus และ Bessing, 1994; Kohavi, 1993) ดังนั้นจึงควรทำชิ้นฟันปลอมให้มีความแนบสนิทของทุกรอยต่อให้มากที่สุด

การทำฟันปลอมให้ได้ออกมานั้นขั้นตอนส่วนใหญ่ทำบนแบบจำลองที่จำลองมาจากผู้ป่วย แม้ว่าขึ้นฟันปลอมที่ได้จะแนบสนิทกับในแบบจำลองเพียงใด แต่ถ้าแบบจำลองนั้นไม่เหมือนกับในช่องปากเมื่อนำขึ้นฟันปลอมไปใส่ในผู้ป่วยย่อมเกิดความไม่แนบสนิทเกิดขึ้น มีรายงานวิธีการสร้างโครงโลหะมากมายให้มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง (Eisenmann และคณะ, 2004; Schmitt และ Chance, 1995) แต่วิธีการเหล่านั้นทำบนแบบจำลอง ดังนั้นการได้แบบจำลองที่เที่ยงตรงนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเริ่มตั้งแต่ วิธีการพิมพ์ปาก ชนิดของวัสดุพิมพ์ปากที่ใช้ มิติเสถียรภาพของวัสดุที่ใช้เทแบบจำลอง และในกระบวนการพิมพ์รากเทียมนั้นมีขั้นตอนที่เพิ่มมาอีก คือการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด (impression coping) ตัวรากเทียมจำลอง (implant body analog) หรือตัวหลักจำลอง (abutment analog) ดังนั้นการถ่ายทอดตำแหน่งที่แม่นยำของรากเทียมจากช่องปากลงบนแบบจำลองจึงเป็นสิ่งสำคัญ (Wee และคณะ, 1998) Sunjai และคณะ (Kim และคณะ, 2006) ได้แบ่งชนิดของความคลาดเคลื่อนในการสร้างแบบจำลองเป็น 4 ชนิด คือ

1. ความคลาดเคลื่อนของการใส่ตัวต่อยอดถ่ายทอดลงบนตัวรากเทียมหรือตัวหลักรากเทียม (implant abutment) ภายในขอบเขตของความสามารถของเครื่องจักรที่ผลิตในการสร้างรอยต่อที่แนบสนิท (machining tolerance)
2. ความคลาดเคลื่อนจากขั้นตอน วิธีการพิมพ์ และวัสดุพิมพ์ปาก
3. ความคลาดเคลื่อนของการใส่ตัวรากเทียมจำลอง หรือละตัวหลักจำลอง ลงในตัวต่อยอดถ่ายทอดที่อยู่ในแบบพิมพ์ ภายในขอบเขตของความสามารถของเครื่องจักรที่ผลิตในการสร้างรอยต่อที่แนบสนิท
4. ความคลาดเคลื่อนของตัวรากเทียมจำลอง หรือตัวหลักจำลอง ในแบบจำลองอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงมิติขณะก่อตัวของปูนที่ใช้เทแบบจำลอง

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตฟันปลอมเพื่อนำมายึดกับรากเทียม จะพบว่าขั้นตอนและกระบวนการทำนั้นต่างไปจากการประดิษฐ์ฟันปลอมติดแน่นทั่วไป กล่าวคือ ในการพิมพ์ปากเพื่อทำฟันปลอมแบบติดแน่นจะสามารถพิมพ์ฟันหลักที่ทำการกรอแต่งแล้วได้โดยตรง แล้วจึงนำไปเทแบบจำลองเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการประดิษฐ์ฟันปลอมแบบติดแน่น ในขณะที่การพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมก่อนนำไปประดิษฐ์ฟันปลอมนั้น ไม่ได้พิมพ์ลงไปโดยตรง แต่จะต้องมีการนำตัวต่อยอดถ่ายทอด (impression coping) มายึดติดกับตัวรากเทียมก่อนแล้วจึงทำการพิมพ์ ซึ่งตัวต่อยอดถ่ายทอดจะเป็นตัวถ่ายทอดตำแหน่งของรากเทียมจากภายในช่องปากไปสู่แบบจำลอง ดังนั้นตัวต่อยอดถ่ายทอดต้องมีความสัมพันธ์ที่แม่นยำกับตัวรากเทียมจึงจะได้แบบจำลองที่มีความเที่ยงตรงด้วย ซึ่งสามารถแบ่งการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมตามลักษณะการยึดติดของตัวต่อยอดถ่ายทอดในวัสดุพิมพ์ปากได้ 2 วิธี (Assif, Marshak และ

Nissan, 1994; Goll, 1991) คือ วิธีพิมพ์โดยอ้อม (indirect technique) และ วิธีการพิมพ์โดยตรง (direct technique)

ในกรณีที่รากเทียมที่ใช้เป็นหลักยึดมีหลายตัวอยู่ในฟันปลอมชิ้นเดียว การพิมพ์รากเทียมด้วยวิธีการพิมพ์โดยตรง สามารถเชื่อมตัวต่อรอยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันด้วยอะคริลิก เรซิน (acrylic resin) หรือคอมโพสิต เรซิน (composite resin) (Loos, 1986) เพื่อเพิ่มควมมีเสถียรภาพในรอยพิมพ์ได้ จากแนวทางดังกล่าวแสดงว่าสามารถเกิดการเคลื่อนที่ของ ตัวต่อรอยอดถ่ายทอดในวัสดุพิมพ์ในระหว่างขั้นตอนการพิมพ์ปากได้ทุกขั้นตอน ทำให้แบบจำลองที่ได้มีการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวรากเทียม หรือตัวหลักจำลองได้ทั้ง 3 มิติ ผลนี้ถ้าเกิดในครอบฟัน 1 ซี่ อาจทำให้เกิดเพียงแค่จุดสบฟันด้านบดเคี้ยว หรือจุดสัมผัสฟันข้างเคียงระหว่างในแบบจำลองกับในช่องปากไม่เหมือนกัน (Vigolo และคณะ, 2005) แต่ถ้าเกิดในสะพานฟันที่มีการเชื่อมรากเทียมเข้าด้วยกันหลายตัว จะเกิดผลเสียที่รุนแรงกว่า อาจเกิดความเค้น ความเครียดตกค้างอยู่ในชิ้นงานเมื่ออยู่ในช่องปากได้ (Skalak, 1983) มีการศึกษาพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับขนาดของความคลาดเคลื่อนนี้ (Clelland และ van Putten, 1997)

การศึกษาที่ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการพิมพ์ต่างๆในกรณีที่ใช้รากเทียมหลายตัวร่วมกัน ได้ผลออกมามากมาย การศึกษาของ carr (Carr, 1991) พบว่าการใช้วิธีพิมพ์ปากโดยตรงให้ผลคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีพิมพ์โดยอ้อม การศึกษาที่พบว่าการเชื่อมตัวต่อรอยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันมีความแม่นยำมากกว่าไม่เชื่อมมีอยู่มาก (Assif และคณะ, 1992; Carr, 1991; Loos, 1986) และมีหลายการศึกษาที่สรุปว่าไม่ว่าจะมีการเชื่อมตัวต่อรอยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันหรือไม่ก็ตามผลที่ได้ก็ไม่แตกต่างกันทางคลินิก (Humphries, Yaman และ Bloem, 1990; Spector, Donovan และ Nicholls, 1990) ส่วนในกรณีที่ฟันที่ติดกับรากเทียม 1 ตัว ก็มีผู้ทำการศึกษาเช่นกัน Schmitt และคณะ (Schmitt และคณะ, 1994) ได้ทำการวัดความแม่นยำของ 2 วิธีการพิมพ์ที่มีการแนะนำโดยบริษัทผู้ผลิต (Nobel Biocare) โดยใช้รากเทียมระบบ 1 ตัว โดยพบว่าการปล่อยให้ตัวต่อรอยอดถ่ายทอดอยู่เป็นอิสระในวัสดุพิมพ์ให้ความแม่นยำมากกว่า นำตัวต่อรอยอดถ่ายทอดไปเชื่อมติดกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล Daoudi และคณะ (Daoudi, Setchell และ Searson, 2001) รายงานผลว่าวิธีการพิมพ์โดยอ้อม ตำแหน่งของตัวหลักจำลองมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าวิธีการพิมพ์โดยตรง Vigolo และคณะ (Vigolo และคณะ, 2005; Vigolo, Majzoub และ Cordioli, 2000) เสนอว่าการใช้ gold machined UCLA abutment ร่วมกับกาวยึด ให้ความแม่นยำมากกว่าการใช้วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับตัวต่อรอยอดถ่ายทอดแบบสี่เหลี่ยมที่ผ่านการเป่าทรายและทาการยึด และก็มีการศึกษา (De La Cruz และคณะ, 2002) ที่พบอีกว่าวิธีการพิมพ์โดยตรงโดยใช้ถาดพิมพ์ชนิดมีรูเปิดด้านบน มีความคลาดเคลื่อนของตัวต่อรอยอดถ่ายทอดในแนวตั้งมากกว่าวิธีพิมพ์โดยอ้อม

ถึงแม้ว่าความแนบสนิทโดยแท้จริงจะไม่สามารถทำได้ในฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียม ชนิดที่ใช้สกรูยึด จึงได้มีการใช้ซีเมนต์เข้ามาช่วยซึ่งลักษณะเหมือนงานสะพานฟันที่รองรับโดยฟันธรรมชาติ โดยอาศัยชั้นของซีเมนต์เข้ามาขัดเซยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น (Chee และคณะ, 1999; Hebel และ Gajjar, 1997) แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่ามีความเค้น และความเครียดตกค้าง อยู่ในชั้นฟันปลอมเช่นกัน (Heckmann และคณะ, 2004)

จากวิธีการพิมพ์รากเทียมที่กล่าวไปจะเห็นได้ว่าวิธีการพิมพ์โดยตรง หรือโดยอ้อม การใช้ การเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายถอดร่วมหรือไม่ก็ตาม แบบจำลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากใส่ตัวต่อยอดถ่ายถอดลงไม่สนิทบนตัวหลัก รากเทียม หรือตัวหลักจำลอง ขั้นตอนการใส่ ตัวต่อยอดถ่ายถอดกลับเข้าไปในรอยพิมพ์ หรือขั้นตอนการขันตัวรากเทียมจำลองติดกับตัวต่อ ยอดถ่ายถอดในรอยพิมพ์ ถ้าสามารถตัดขั้นตอนนี้ออกไปได้แบบจำลองที่ได้ควรจะมี ความเที่ยงตรงที่มากกว่าเดิม โดยในงาน International Dental Implantology Congress ครั้งที่ 2 รศ. ทพ.ภาณุพงศ์ วงศ์ไทย ได้แนะนำให้พิมพ์รากเทียมแบบไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ โดยการใส่ตัวหลักลงบนรากเทียมแล้วทำการกรอแต่ง จากนั้นจึง แยกเหงือกและพิมพ์ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดที่เป็นสาเหตุของความ คลาดเคลื่อน แต่ตัวหลักจะเกิดจากการลอกเลียนของปูนและวัสดุพิมพ์แทนที่จะเป็นตัวหลัก จำลอง

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเห็นควรที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีพิมพ์รากเทียมแบบต่างๆ อัน ได้แก่ วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ และ ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอด ทั้งที่มีการเชื่อมต่อและไม่เชื่อมต่อเข้ากับถาดพิมพ์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่เกิดจากวิธีการพิมพ์ 3 วิธี โดยนำมาเทียบกับแม่แบบที่ใช้แทนรากเทียมในปากผู้ป่วย ได้แก่

1. วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ
2. วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดร่วมด้วย
3. วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายถอดและทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์

ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ทำการจำลองรากเทียมในผู้ป่วยโดย ทำแบบจำลองจากโลหะซึ่งมีรากเทียมระบบ Spline (Sulzer Calcitek, Carlsbad, CA) ฝังอยู่ ภายใน จากนั้นนำแม่แบบนี้ไปผ่านการพิมพ์รากเทียมด้วยวิธีต่างๆ แล้วเทเป็นแบบจำลอง เพื่อทำ

การวัดผลของแต่ละวิธีพิมพ์ โดยใช้เครื่อง measurement microscope (MEIJI TECHNO CO.,LTD. Japan) ที่ระดับความละเอียด 1 ไมโครเมตร วัดค่าออกมาเป็นพิกัด (x,y,z) และอ้างอิงผลการทดลองเพื่อบอกแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในทางคลินิก การวิจัยนี้จะศึกษาวิธีพิมพ์ 3 วิธี แต่จำเป็นต้องวัดผลที่แบบจำลอง ซึ่งอาจจะมีขนาดคลาดเคลื่อนจากสาเหตุต่าง ๆ โดยเฉพาะการหดตัวของวัสดุพิมพ์ และการขยายตัวของปูน เป็นผลให้ผลการวิจัยคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ซึ่งได้พยายามควบคุมให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด และเกิดเท่าๆกันในทุกแบบจำลอง อีกทั้งตลอดการทำงานจะทำโดยผู้ทำการทดลองเพียงคนเดียว ใช้อุปกรณ์เดียวกันต่อเนื่องทั้งการวิจัย และทำการฝึกวัดผลข้อมูลจนสามารถวัดซ้ำที่เดิมได้ใกล้เคียงที่สุดที่ระดับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 2 ไมโครเมตร

ข้อจำกัดของการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ จึงไม่สามารถควบคุมบางปัจจัยให้เหมือนในช่องปากได้จริง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น

คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

Acrylic resin	อะคริลิกเรซิน
Abutment analog	ตัวหลักจำลอง
Implant	รากเทียม
Implant abutment	ตัวหลักรากเทียม
Implant analog	รากเทียมจำลอง
Impression technique	วิธีพิมพ์ปาก
Conventional impression technique	วิธีพิมพ์ปากด้วยวิธีดั้งเดิมแบบเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ
Direct technique	วิธีพิมพ์โดยตรง
Indirect technique	วิธีพิมพ์โดยอ้อม
Passive fit	ความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง
Transfer coping	ตัวต่อยอดถ่ายทอด
Direct transfer coping	ตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยตรง
Indirect transfer coping	ตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยอ้อม

คำถามการวิจัย

1. วิธีพิมพ์ปากแบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ และวิธีการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วยมีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลองรากเทียมหรือไม่

2. การเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์ มีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลองรากเทียมหรือไม่

สมมุติฐานการวิจัย

1. ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ และวิธีการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วยมีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลองรากเทียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2. ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่มีการเชื่อม และไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ทั้งนี้ทำการทดลองเพื่อทดสอบสมมุติฐานที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้วิธีการพิมพ์ปากที่ให้ความเที่ยงตรงของแบบจำลองมากที่สุด
2. ได้มาซึ่งปัจจัยที่มีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากแต่ละวิธีพิมพ์
3. เป็นข้อมูลในการศึกษาวิจัยในอนาคต เพื่อพัฒนากระบวนการพิมพ์รากเทียมให้ดียิ่งขึ้น

การออกแบบการวิจัย

การวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Experimental Research)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่มา แนวคิด และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะจำแนกเป็นหัวข้อดังนี้

ความหมายของรากเทียม

ปัจจัยที่มีผลต่อความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงของโครงโลหะฟันปลอม

การยึดติดของฟันปลอมบนรากเทียม

วัสดุพิมพ์ปาก

ถาดพิมพ์ปาก

กระบวนการพิมพ์ปาก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการวัด

ความหมายของรากเทียม

รากเทียม คือ วัตถุที่ใส่เข้าไปในกระดูกหรือวางอยู่เหนือกระดูกขากรรไกรเพื่อใช้ในการรองรับและให้การยึดอยู่สำหรับฟันเทียมชนิดติดแน่นหรือถอดได้ (The glossary of prosthodontic terms, 2005) ความแตกต่างระหว่างรากเทียมกับฟันธรรมชาติคือ ฟันธรรมชาติจะมีเอ็นยึดปริทันต์ล้อมรอบทำหน้าที่ดูดซับแรง ซึ่งจะช่วยลดความเค้นที่ถ่ายทอดไปสู่กระดูก และทำให้เมื่อมีการสบฟันที่มีภัยอันตรายฟันจะมีการขยับตัวได้เพื่อลดความเสียหาย รวมถึงการที่ค่าสัมประสิทธิ์การยึดหยุ่นของฟันธรรมชาติมีค่าใกล้เคียงกระดูกมากกว่ารากเทียม ทำให้ความเค้นและความเครียดของรากเทียมจะถ่ายทอดไปที่ยอดของกระดูกมากกว่า ดังที่ได้กล่าวแล้วว่า ฟันธรรมชาติมีการเคลื่อนขยับที่แตกต่างจากตัวรากเทียม เนื่องจากในฟันธรรมชาติมีเอ็นยึดปริทันต์ทำให้มีความยืดหยุ่น จึงเกิดการกระจายแรงตลอดความยาวของรากฟันโดยมีจุดศูนย์กลางของการหมุนอยู่ที่บริเวณ 1/3 ของปลายราก ยิ่งรากฟันยาวเพิ่มขึ้นเท่าใดการกระจายแรงสู่กระดูกเบ้าฟันก็ยิ่งดีขึ้นเท่านั้น ในขณะที่ตัวรากเทียมมีการขยับได้น้อยมาก ดังนั้นฟันปลอมที่รองรับด้วยตัวรากเทียมแบบเกลียวจึงเกิดการสะสมแรงจากการบิดเคี้ยวเกือบทั้งหมดอยู่บริเวณเกลียวที่ 3 ของรากเทียม ทำให้มีการกระจายของแรงส่วนใหญ่ไปที่สันกระดูก ส่วนรากเทียมชนิดทรงกระบอกกลับมีการสะสมแรงบริเวณส่วนปลาย อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงในแนวระนาบมากระทำกับตัวรากเทียมทั้งสองแบบ พบว่าการกระจายแรงจากรากเทียมมักไปสู่บริเวณสันกระดูก (Rieger, Mayberry และ Brose, 1990) ข้อแตกต่างระหว่างฟันธรรมชาติกับรากเทียมอีกประการ

หนึ่งก็คือ การยึดติดของฟันปลอมชนิดติดแน่นกับฟันธรรมชาติมักใช้ซีเมนต์ ทำให้ทั้งฟันปลอมและฟันธรรมชาติเสมือนเป็นหน่วยเดียวกัน ต่างกับฟันปลอมติดแน่นที่ยึดบนรากเทียมซึ่งมีการใช้สกรูเป็นส่วนร่วมในการยึดติด ซึ่งตัวสกรูมีขนาดเล็กจะมีผลทางกลศาสตร์ในด้านความสามารถในการคืนตัวของโลหะ ตัวสกรูจึงเกิดการเปลี่ยนรูปในขณะที่มีการบดเคี้ยว ทำให้บริเวณรอยต่อของส่วนต่างๆของฟันปลอมกับตัวรากเทียมเกิดการยับยั้งได้เล็กน้อย ด้วยเหตุนี้รูปแบบการกระจายแรงจากฟันธรรมชาติไปสู่กระดูกจึงต่างจากการกระจายแรงจากรากเทียมไปสู่กระดูก

ในการยึดฟันธรรมชาติเข้าด้วยกันโดยการใส่สะพานฟัน เมื่อมีการบดเคี้ยว แรงเหล่านี้จะมีการกระจายไปสู่ส่วนอื่นๆของฟันปลอมโดยทั่วถึง และกระจายไปสู่รากฟันที่ถูกยึดทุกซี่แล้วจึงถ่ายทอดสู่กระดูกที่รองรับอีกทอดหนึ่งอันเนื่องมาจากความหยุ่นตัวของเอ็นยึดปริทันต์ ในขณะที่ฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมหลายๆซี่กลับมีการกระจายแรงไปสู่ส่วนต่างๆของฟันปลอมที่ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อมีแรงบดเคี้ยวกระทำต่อบริเวณใดบริเวณหนึ่งของฟันปลอม แรงบดเคี้ยวจะกระจายไปสู่ตัวรากเทียมและสันกระดูกบริเวณนั้นเป็นส่วนใหญ่ มีการกระจายไปสู่ส่วนอื่นๆของฟันปลอม และรากเทียมตัวอื่นน้อยมากแต่ก็ยังพอเกิดได้บ้างซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการคืนตัวของสกรูที่ใช้ยึดฟันปลอม ระดับการเปลี่ยนรูปของสกรู ตัวหลัก ตัวรากเทียม และกระดูกที่รองรับ รวมทั้งความแนบสนิทระหว่างตัวฟันปลอมกับรากเทียม ดังนั้นทำให้การประดิษฐ์ฟันปลอมเพื่อนำมายึดกับรากเทียมจึงต้องการความแนบสนิทพอดีของโครงโลหะของฟันปลอมกับตัวรากเทียม หรือตัวหลัก

Parel (Parel, 1989) ได้ให้ความหมายของคำว่าแนบสนิทพอดีว่า เป็นความแนบสนิทกันของทุกๆส่วนของผิวสัมผัสที่เป็นโลหะของโครงโลหะกับผิวสัมผัสของตัวรากเทียมที่นำมายึดติดกัน ซึ่งความแนบสนิทพอดีนี้จะประกอบด้วย การสวมโครงโลหะบนตัวรากเทียมให้เข้าที่พร้อมๆกันโดยใช้แรงกดเพียงเบาๆเท่านั้น (Aparicio, 1994) และเมื่อทำการกดด้านใดด้านหนึ่งของโครงโลหะจะต้องไม่มีการกระดกของด้านตรงข้าม หรือเมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี "one screw test" จะต้องไม่มีการยกตัวของโครงโลหะออกจากตัวรากเทียมตัวอื่นๆ (Tan และคณะ, 1993) ส่วน Klineberg และ Murray ได้ตั้งเกณฑ์การยอมรับความแนบสนิทพอดีโดยพิจารณาว่า ช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวรากเทียมจะต้องไม่เกิน 30 ไมโครเมตร และเป็นบริเวณไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 โดยรอบตัวรากเทียม Sorensen และคณะ (Sorensen, Avera และ Tomas, 1991) ศึกษาเกี่ยวกับความแนบสนิทของฟันปลอมกับตัวรากเทียม หรือกับตัวหลักในรากเทียมหลายๆระบบยอมรับความแนบสนิทพอดีในทางคลินิกว่าจะต้องมีช่องว่างระหว่างรอยต่อไม่เกิน 20-40 ไมโครเมตร ส่วน Millington และ Leung (Millington และ Leung, 1992) กล่าวว่า ถ้าช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวรากเทียมมีค่ามากกว่า 50 ไมโครเมตรแล้วจะไม่สามารถดึงโครงโลหะให้เข้ามาแนบสนิทกับตัวรากเทียมโดยใช้สกรู

ในทางตรงกันข้าม Jemt (Jemt และ Lie, 1995) พบว่าช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวหลักที่มีขนาด 150 ไมโครเมตร เป็นขนาดที่ยอมรับได้ในทางคลินิก และสามารถใส่สกรูขึ้นเพื่อดึงโครงโลหะให้เข้ามาแนบกับตัวหลักได้ Yanase (Yanase, 1994) ได้ทำการศึกษาและได้ผลเช่นเดียวกัน ส่วน Riedy และคณะ (Riedy และคณะ, 1997) กล่าวว่า สายตาของมนุษย์ไม่สามารถที่จะตรวจสอบรอยต่อที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นช่องว่างของรอยต่อที่น้อยกว่า 25 ไมโครเมตร จึงถือเป็นขนาดที่ยอมรับได้ทางคลินิก นอกจากนี้ยังมีผู้ที่เกี่ยวข้องถึงวิธีการตรวจสอบความแนบสนิทพอดีในทางคลินิก เช่น การใช้แสงสว่างและกล้องขยาย (Henry, 1987) การใช้เครื่องมือปลายแหลม (explorer) และความรู้สึกเพื่อตรวจสอบรอยต่อ (Loos, 1986) การใช้ fit checker (G-C Internat Scottsdale, AZ) (Goll, 1991) หรือการตรวจสอบว่ามีฟองน้ำลายระหว่างรอยต่อของโครงโลหะกับตัวหลักหรือไม่ โดยการพยายามหมุนโครงโลหะบนตัวรากเทียม Carr (Carr และ Toth, 1996) กล่าวว่าช่องว่างขนาดต่ำกว่า 41 ไมโครเมตร สามารถยอมรับได้ในทางคลินิก Jemt (Jemt, 1996) พบว่าฟันปลอมที่ขึ้นปากร่วมกับรากเทียมที่ในทางคลินิกยอมรับได้นั้น ยังมีช่องว่างรอยต่ออยู่ถึง 90 ไมโครเมตร ในขากรรไกรล่าง และ 111 ไมโครเมตร ในขากรรไกรบน จากการศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าความคิดเห็นเกี่ยวกับเกณฑ์การยอมรับความแนบสนิทพอดีมีความแตกต่างกันไป ซึ่งจนถึงปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลใดที่ยืนยันได้อย่างชัดเจนว่า ขนาดของช่องว่างระหว่างรอยต่อของโครงโลหะกับตัวรากเทียมหรือตัวหลักควรมีค่าเท่าใดจึงจะสามารถยอมรับได้ว่ามีความแนบสนิทพอดี (Jemt และคณะ, 1996) อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากการใช้ขนาดช่องว่างตรงบริเวณรอยต่อเป็นตัวบ่งถึงความแนบสนิทพอดีแล้วการที่ฟันปลอมและส่วนประกอบมีความแนบสนิทจะทำให้สามารถใช้งานได้อย่างยืนยาวโดยไม่เกิดความเสียหาย ในขณะที่เดียวกันก็สามารถรักษาการยึดติดของตัวรากเทียมกับกระดูกในลักษณะ osseointegration เอาไว้ได้ ซึ่งมีความสำคัญและต้องนำมาพิจารณาพร้อมด้วย (Tan และคณะ, 1993)

ความแนบสนิทระหว่างฟันปลอมกับตัวหลักและความแข็งแรงของโลหะจะมีผลอย่างมากต่อการกระจายของโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้น ถ้าไม่มีความแนบสนิทพอดีระหว่างฟันปลอมกับตัวหลัก จะทำให้ตัวรากเทียมบางตัวต้องรับแรงที่มากกว่าปกติ ซึ่งได้แก่รากเทียมที่มีตัวหลักแนบสนิทกับฟันปลอม ในขณะที่รากเทียมบางตัวรับแรงน้อยกว่าปกติ และสกรูของรากเทียมตัวที่ไม่แนบสนิทรับแรงมากกว่าปกติ (Kunavisarut และคณะ, 2002) เมื่อพิจารณารอยต่อของฟันปลอมกับตัวหลักที่ไม่มีความแนบสนิท จะมีแรงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกถ่ายทอดไปสู่ตัวหลักโดยผ่านบริเวณที่มีการสัมผัสกัน และรอยต่อระหว่างฟันปลอมกับตัวหลักที่ไม่แนบสนิทจะไม่สามารถต้านต่อแรงบิดเคี้ยวได้อย่างเต็มที่ ทำให้มีแรงเฉือนที่มากกว่าปกติกระทำต่อตัวสกรูยึดฟันปลอมโดยตรง ซึ่งในภาวะปกติแรงกระทำก่อน (preload) ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของตัวหลักกับฟัน

ปลอม จะเป็นตัวกำจัดแรงเฉือนที่เกิดกับตัวสกรู เมื่อไรก็ตามที่แรงเฉือนมีค่ามากกว่าแรงกระทำก่อน รอยต่อจะเริ่มเปิด และสกรูเกิดการเสียรูป ถ้าได้รับแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆสกรูจะเกิดการหักในที่สุด ลักษณะเช่นนี้แรงจะถูกส่งต่อไปสู่รากเทียมตัวที่เหลืออยู่ซึ่งอาจทำให้รากเทียมตัวอื่นรับแรงที่มากกว่าปกติได้

ปัจจัยที่มีผลต่อความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงของโครงโลหะของฟันปลอม

Michalakis และคณะ (Michalakis และคณะ, 2003) ได้จำแนกผลที่เกิดจากการที่โครงโลหะไม่มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม

1. ผลทางชีววิทยา (biologic complications) ได้แก่ เกิดการเพิ่มแรงที่ถ่ายทอดไปสู่กระดูก มีการสูญเสียกระดูก มีการเกิดและเก็บสะสมของเชื้อโรคในช่องว่างระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียม

2. ผลในฟันปลอม (prosthetic complications) ได้แก่ สกรูหลวม สกรูหัก รากเทียมหัก

กระบวนการสร้างฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมต้องการความแม่นยำอย่างมากทั้งในทางคลินิก และทางห้องปฏิบัติการ (Hobo, Ichida และ Garcia, 1989) แต่ละขั้นตอนในกระบวนการทำสามารถเกิดความคลาดเคลื่อนปริมาณน้อยได้ แต่เมื่อเกิดหลายๆจุดรวมกันเข้าก็จะเป็นความคลาดเคลื่อนในระดับที่มีผลกับฟันปลอมและรากเทียม Nicholls (Nicholls, 1977, , 1978, , 1980) ให้คำจำกัดความของความคลาดเคลื่อน (distortion) ที่เกิดระหว่างการสร้างโครงโลหะว่าเป็นความสัมพันธ์ของจุด 1 จุด หรือกลุ่มของจุด ที่ต่างไปจากจุดอ้างอิงดั้งเดิมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถเกิดได้ทั้ง 3 มิติ ในแง่ของการหมุน (rotational axes) ($d\theta_x$, $d\theta_y$, $d\theta_z$) และการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งของแกนหลัก (translational axes) (x, y, z) ซึ่งสามารถเกิดได้ทุกๆขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอนพิมพ์ปากไปจนถึงขั้นตอนการใส่ฟันปลอมให้กับผู้ป่วย โดยผลรวมของความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่เกิดระหว่างกระบวนการผลิต เมื่อผลรวมของความคลาดเคลื่อนเหล่านี้เป็นศูนย์ จึงจะได้มาซึ่งความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง (passive fit) คำถามมีมากขึ้นว่าต้องทำอะไรความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงของโครงโลหะถึงจะได้มา

ความคลาดเคลื่อนที่เป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นในขั้นตอนงานบูรณะนั้นเริ่มตั้งแต่ กระบวนการพิมพ์ปาก กระบวนการสร้างแบบจำลองหลัก (master cast) การทำกระสวนขี้ผึ้ง (wax patterns) การลงอินเวสเมนต์ (investment) การเหวี่ยงโครงโลหะ ระหว่างการเผาพอสเลน ไปจนกระทั่งขณะใส่ฟันปลอม ดังนี้

1.ระหว่างขั้นตอนการพิมพ์ปาก

การพิมพ์ปากมี 2 วิธีหลัก คือ วิธีพิมพ์โดยตรง (direct transfer method) และวิธีพิมพ์โดยอ้อม (indirect transfer method) โดยวิธีพิมพ์แบบโดยตรงชนิดยกขึ้น (pick up) ให้ผลที่ค่อนข้างคงที่และแน่นอนมากกว่าวิธีพิมพ์โดยอ้อม ชนิดใส่กลับที่เดิม (repositioning) ที่ให้ผลของตำแหน่งของตัวหลักจำลองได้หลากหลาย และบ่อยครั้งที่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดโดยวิธีพิมพ์โดยอ้อมมีทั้งแบบหมุน และในแนวแกนตั้ง (Barrett, de Rijk และ Burgess, 1993; Carr, 1991; Daoudi และคณะ, 2001) ส่วนวิธีการที่จะเชื่อมตัวต่อรอยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันด้วย อะคริลิก (acrylic) หรือไม้นั้นยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ assif และคณะ (Assif และคณะ, 1992) พบว่าการเชื่อมตัวต่อรอยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ในทางตรงกันข้าม Phillips และคณะ (Phillips และคณะ, 1994) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของ 2 วิธีดังกล่าว

ความมีมิติเสถียรภาพของวัสดุพิมพ์ปากก็เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งวัสดุพิมพ์ทั้ง ซิลิโคน (polyvinylsiloxane) และโพลีเอเทอร์ (polyether) (Barrett และคณะ, 1993; Daoudi และคณะ, 2001) ให้ความมีเสถียรภาพที่เหมาะสมและเพียงพอต่อขั้นตอนการพิมพ์รากเทียม

ระดับการยอมรับความสามารถของเครื่องกลึงในการผลิตให้รอยต่อระหว่างส่วนประกอบต่างๆให้มีความแนบสนิท (machine tolerance) แม้ว่าจะยังไม่มีข้อมูลที่สามารถหาได้เกี่ยวกับส่วนประกอบดังกล่าว Binon (Binon, 2000) ได้กล่าวว่าความทนทานในตำแหน่งที่สำคัญควรมีค่าตั้งแต่ ± 3.0 ไมโครเมตร ไปจนถึง ± 101.6 ไมโครเมตร ซึ่งแต่ละบริษัทที่ผลิตรากเทียมไม่ได้ให้ข้อมูลในจุดนี้

2.ระหว่างขั้นตอนการสร้างแบบจำลองหลัก

ในส่วนของการขยายตัวขณะก่อตัวของปูนทางทันตกรรมนั้น ปูนทันตกรรมชนิดที่ 4 บ่อยครั้งถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองหลักมีการขยายตัวขณะก่อตัว 0.1% ขณะที่ปูนทันตกรรมชนิดที่ 5 ขยายตัว 0.3% เพื่อชดเชยการหดตัวอย่างมากขณะเหวี่ยงโครงโลหะด้วยโลหะพื้นฐาน (base metal) (Phillips, 1991)

สิ่งที่สำคัญคือต้องเข้าใจทฤษฎีการเกิดปฏิกิริยาก่อตัวของคริสตัลที่เสนอโดย Henry Louis Le Chatelier เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1887 ซึ่งต่อมาได้รับการสนับสนุนโดย Jacobus Hendricus van't Hoff โดยได้อธิบายว่า ปฏิกิริยาก่อตัวของน้ำร่วมกับ แคลเซียม ซัลเฟต เฮมิไฮเดรต (calcium sulfate hemihydrate) กลายเป็น แคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรต (calcium sulfate dihydrate) เกิดจากความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันของสององค์ประกอบ ซึ่งแคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรต มีความสามารถในการละลายที่ต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อ แคลเซียม ซัลเฟต

เฮมิไฮเดรต ละลายในน้ำ แคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรต จะอิมตัวและตกตะกอนออกมาเกิดเป็นจุดเริ่มต้นในการสร้างคริสตัลรูปเข็ม และมีการเชื่อมต่อกันของคริสตัลแต่ละอันเป็นโครงสร้างขึ้นมา

ตามทฤษฎีแล้ว แคลเซียม ซัลเฟต เฮมิไฮเดรต ควรเกิดการหดตัวของปริมาตรในขณะก่อตัว แต่เมื่อมีการทดลองวัดขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับพบว่ามีการขยายตัวแบบเส้นตรงระหว่างก่อตัว เมื่อทำการผสม แคลเซียม ซัลเฟต เฮมิไฮเดรต 145.15 กรัม กับน้ำ 27.02 กรัม จะได้แคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรต 172.17 กรัม แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นการผสมโดยปริมาตร กลับพบว่าแคลเซียม ซัลเฟต เฮมิไฮเดรต กับน้ำ มีปริมาตรน้อยกว่า แคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรต ถึง 7 % และในทางปฏิบัติ พบว่าเกิดการขยายตัวในแนวเส้นตรง 0.2-0.4% ซึ่งจากทฤษฎีของ Le Chatelier และ van't Hoff ผลของการขยายตัวเกิดจากการผลึกกันของผลึกคริสตัล แคลเซียม ซัลเฟต ไดไฮเดรต ในขณะก่อตัวจากการอิมตัวของสารละลาย ซึ่งเมื่อรวมผลของการหดตัวที่วัดได้จากเครื่อง dilatometer ประมาณ 7 % และการขยายตัวที่เกิดขึ้นทำให้เมื่อป้อนก่อนตัวแล้วจึงมีลักษณะเป็นรูพรุน

ผลิตภัณฑ์จากยิบซัมจะเกิดการขยายตัวเมื่อก่อตัว ซึ่งต่างกันไปตามแต่ชนิดของยิบซัมนั้น ซึ่งปูนปลาสเตอร์มีการขยายตัว 0.2-0.3% สโตนทันตกรรมชนิดความแข็งแรงต่ำถึงปานกลางขยายตัวประมาณ 0.15-0.25% สโตนทันตกรรมชนิดความแข็งแรงสูงขยายตัวเพียง 0.08-0.10% สโตนทันตกรรมชนิดความแข็งแรงสูงและขยายตัวสูง ขยายตัว 0.10-0.20% โดย 75% ของการขยายตัวใน 24 ชม. เกิดขึ้นที่ชั่วโมงแรกของการก่อตัว

การขยายตัวขณะก่อตัวสามารถควบคุมได้โดยสภาวะการผสมแบบต่างๆ และโดยการใส่สารเคมีลงไป การใช้เครื่องผสมสามารถลดการขยายตัวได้ เช่นการใช้เครื่องดูดสูญญากาศในระหว่างการผสม สโตนทันตกรรมชนิดความแข็งแรงสูง มีการขยายตัวเมื่อวัดที่ 2 ชม. (0.037%) ต่ำกว่าการใช้มือผสม (0.045%) การใช้เครื่องผสมจะเกิดการหดตัวในช่วงแรกสูงกว่าการใช้มือผสม อัตราส่วนของ น้ำต่อผง ก็มีผลด้วย โดยเมื่อเพิ่มน้ำมากขึ้นจะมีการขยายตัวลดลง การใส่สารเคมีลงไปนอกจากจะมีผลกับการขยายตัวของปูนแล้วยังมีผลกับคุณสมบัติอื่นๆด้วย เช่น การใส่ โซเดียม คลอไรด์ (NaCl) ลงไปเล็กน้อยจะเกิดการขยายตัวมากขึ้นและระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง การใส่โบตัสเซียม ซัลเฟต ลงไปจะลดระยะเวลาก่อตัว แต่ไม่มีผลกับการขยายตัว

ถ้าในระหว่างการก่อตัว ปูนถูกจุ่มลงในน้ำ การขยายตัวขณะก่อตัวจะมากขึ้น เราเรียกว่า hygroscopic expansion ซึ่งโดยปกติแล้ว สโตนทันตกรรมชนิดความแข็งแรงสูง จะมีการขยายตัวขณะก่อตัว 0.08% แต่ถ้าในขณะก่อตัวถูกจุ่มลงในน้ำ การขยายตัวจะเป็น 0.10% การขยายตัวนี้มักพบในขณะที่ยังไม่ก่อตัวและสัมผัสกับวัสดุพิมพ์ปากชนิดไฮโดรคอลลอยด์

3.ระหว่างขั้นตอนการสร้างกระสวยซีเมนต์

การบิดเบี้ยวของซีเมนต์ ปกติแล้วซีเมนต์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นในทางทันตกรรม และมีเสถียรภาพของมันถูกควบคุมด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงมิตินี้ทำให้เกิดความไม่แน่นอนหากไม่สามารถชดเชยด้วยกระบวนการอื่นๆได้พอ

การหดตัวของซีเมนต์เมื่อเย็นตัวจากของเหลวไปสู่ของแข็งมีค่ามากได้ถึง 0.4% และการขึ้นรูปกระสวยซีเมนต์ที่ใช้ความร้อนไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความเค้นสะสมตกค้างรอบๆที่จะคือตัวอยู่ในซีเมนต์ได้ (O'Brien, 1997b)

4.ระหว่างขั้นตอนการลงอินเวสเมนต์ และขั้นตอนการเหวี่ยงโครงโลหะ

การขยายตัวของอินเวสเมนต์ โดยเฉพาะอินเวสเมนต์ชนิด High-heat, phosphate-bond มีค่าการขยายตัวขณะก่อตัวอยู่ระหว่าง 0.23% ถึง 0.50% ค่าการขยายตัวเมื่อดูดซับน้ำ (hygroscopic expansion) คือ 0.35% ถึง 1.20% และค่าการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนคือ 1.33% ถึง 1.58% (700°C) (O'Brien, 1997b)

การหดตัวของโลหะสามารถแสดงได้เป็น 3 ระยะ

1.การหดตัวทางอุณหภูมิ (thermal contraction) ของโลหะเหลวระหว่างอุณหภูมิที่ตัวโลหะได้รับความร้อนและอุณหภูมิของเหลว (liquidus temperature)

2.การหดตัวของโลหะโดยกำเนิดเมื่อมันเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็ง

3.การหดตัวทางอุณหภูมิของโลหะในสถานะของแข็ง เกิดเมื่ออุณหภูมิโลหะลดลงถึงอุณหภูมิห้อง

การหดตัวทางอุณหภูมิของโลหะผสมทางทันตกรรมมีค่าได้ตั้งแต่ 1.42% สำหรับชนิดที่ 3 และ 1.56% สำหรับชนิดที่ 1 (Craig, 1997)

5.ระหว่างขั้นตอนการเผาพอสเลน

การบิดเบี้ยวจะเกิดในส่วนลำตัวของส่วนโค้ง และในโครงโลหะของสะพานฟันที่มีความยาวมากในระหว่างกระบวนการเผาพอสเลน รูปแบบการบิดเบี้ยวในสะพานฟันที่โค้งจะใกล้เคียงด้านหลังหรือด้านลิ้น และมีการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าในส่วนด้านหน้า การบิดเบี้ยวนี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงในโลหะและการหดตัวของพอสเลน และมักเกิดมากในระหว่างขั้นตอน degassing และขั้นตอนการเกรสครั้งสุดท้าย (final glaze) ในกระบวนการเผาพอสเลน (Bridger และ Nicholls, 1981)

6.ระหว่างขั้นตอนการใส่ฟันปลอมและการใช้งาน

ความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของทันตแพทย์ในการปรับแต่งโครงโลหะซึ่งวิธีตรวจสอบดังที่กล่าวไปแล้ว

การบิดเบี้ยวของขากรรไกรล่าง (mandibular flexure) มีการศึกษาทางคลินิกในผู้ป่วยที่มีฟันทั้งปาก และผู้ที่มีฟันหายไปบางส่วนในขากรรไกรล่าง (De Marco และ Paine, 1974; Fischman, 1976; Goodkind และ Heringlake, 1973) Hobkirk และ Schwab แสดงให้เห็นว่าในกลุ่มตัวอย่างที่ใส่ฟันในขากรรไกรล่างและมีการใส่รากเทียมชนิดที่มี osseointegration นั้นเมื่อขากรรไกรมีการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งพัก เป็นผลให้มีการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งระหว่างตัวรากเทียมสูงถึง 420 ไมโครเมตรและแรงนั้นส่งผ่านไปยังรากเทียมที่เชื่อมอยู่ด้วยกันถึง 16 นิวตัน และยังพบอีกว่าแรงที่เกิดขึ้นและการเปลี่ยนตำแหน่งนั้นเกิดขึ้นน้อยมากในขณะที่มีการเอียงขากรรไกรไปด้านข้าง แต่เกิดมากกว่าในการอ้าปาก และเอียงคางมาด้านหน้าตรง และมีความหลากหลายมากในระหว่างบุคคล และมันมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นในผู้ป่วยที่มีการฝังรากเทียมกระจายกว้างในขากรรไกรล่างที่บาง

ความคลาดเคลื่อนที่มีสาเหตุมาจากขั้นตอนต่างๆที่กล่าวไปนั้นมีค่าน้อยมากจนไม่มีผลทางคลินิก แต่อย่างไรก็ตามผลรวมของความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ทุกขั้นตอนสามารถทำให้เกิดความเครียดสะสมอยู่ภายในชิ้นฟันปลอมและรากเทียมได้ ทฤษฎีของ Skalak's (Skalak, 1983) ที่กล่าวว่าฟันปลอมที่ไม่มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงสามารถทำให้เกิด ผลทางชีววิทยา และผลในฟันปลอมนั้นยังไม่สามารถพิสูจน์ได้ การวิจัยในสัตว์ทดลอง (Carr และคณะ, 1996) และงานวิจัยทางคลินิกที่มีข้อจำกัด (Jemt และ Book, 1996; Rubenstein, 1995) บ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นไปได้ที่โครงโลหะที่ไม่ได้แนบสนิทอย่างเที่ยงตรงไม่จำเป็นต้องเป็นสาเหตุของปัญหาทางชีวกลศาสตร์ ในการบูรณะด้วยฟันปลอมร่วมกับรากเทียม

นักวิจัยหลายคนพยายามค้นหาวิธีที่ได้มาซึ่งความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงแต่ผลที่ได้คือไม่มีวิธีใดสามารถทำได้ Ness และคณะ (Ness และคณะ, 1992) ทดลองประดิษฐ์ฟันปลอมให้ได้ความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง โดยใช้อะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง แต่ผลที่ได้คือไม่มีฟันปลอมชิ้นใดที่มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง Jemt และคณะ (Jemt และคณะ, 1996) ได้ทำการทดลอง 2 การศึกษาถึงความแนบสนิท โดยใช้ เลเซอร์ เวล (laser-welded) เชื่อมต่อโครงโลหะที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างรากเทียม กับฟันปลอม ซึ่งสรุปจากการทดลองได้ว่าวิธีนี้ไม่สามารถทำให้เกิดความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงได้ Van Roekel (Van Roekel, 1992) ในปี 1992 Schmitt และ Chance (Schmitt และ Chance, 1995) ในปี 1995 และ LaBarge ในปี 1997 ได้รายงานถึง "electric discharge machining" ซึ่งเป็นที่รู้จักโดยทั่วกันในชื่อ "spark erosion" วิธีนี้ประกอบด้วยการใช้ electric discharge ความเข้มข้นสูงผ่านเครื่องจักรในการทำให้โลหะ หรือ

โลหะผสมมีรูปร่างตามที่ต้องการ มีการทดลองในห้องปฏิบัติการโดย Linehan และ Windeler (Linehan และ Windeler, 1994) แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถปรับปรุงความแนบสนิทบนโครงโลหะให้มีมากขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงก็ยังไม่ได้มาเช่นกัน Waskewitz และคณะ (Waskewitz, Ostrowski และ Parks, 1994) แสดงให้เห็นว่า กระบวนการทำกระสวนขึ้นผึ้ง การเหวี่ยงโครง การตัด และการเชื่อมต่อ โครงโลหะ ไม่มีวิธีการใดที่ให้ความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง

วิธีการใช้ซีเมนต์เชื่อมตัวหลัก กับโครงโลหะ อย่างเช่นวิธี Preci-disc (Uludamar และ Leung, 1996) (Ceka-Vertrieb, Hannover, Germany) และ Kal (Kulzer Abutment Luting; Heraeus Kulzer, Wehrheim, Germany) (Aparicio, 1995) สามารถปรับปรุงความแนบสนิทของโครงโลหะส่วนบน (superstructure) กับตัวรากเทียมได้แต่ก็ยังไม่ได้มาซึ่งความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงโดยสมบูรณ์ (Duyck และ Naert, 2002; Wee และคณะ, 1999) แม้ในปัจจุบันนี้ก็ยังไม่มีการตีพิมพ์รายงานใดที่มีข้อมูลสนับสนุนว่าสามารถทำให้เกิดความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงของ โครงโลหะส่วนบนกับตัวรากเทียมชนิดที่ใช้สกรูยึด Jemt และ Book (Jemt และ Book, 1996) ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความไม่แนบสนิทของชิ้นฟันปลอมร่วมกับรากเทียม และการสูญเสียของขอบกระดูกในช่วงระยะเวลา 5 ปี พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่เขาก็ได้ข้อควรพิจารณาคือความล้าที่เกิดในฟันปลอม ตำแหน่งที่มีการปลูกกระดูกหรือบริเวณที่มีปริมาณกระดูกน้อย และต่อมามีการศึกษาอื่นอีก (Bergendal และ Palmqvist, 1995) ซึ่งให้เห็นว่าร่างกายมีระดับความทนทาน (biologic tolerance) ต่อความไม่แนบสนิทนี้ อย่างไรก็ตามมีการศึกษาในสัตว์ทดลองที่พบว่าความไม่แนบสนิทของชิ้นฟันปลอมกับรากเทียมนั้นทำให้เกิดการงอกเกินของกระดูกได้

Taylor และคณะ (Taylor, Agar และ Vogiatzi, 2000) ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโครงโลหะส่วนบนที่ยึดกับรากเทียมด้วยซีเมนต์มีความเป็นไปได้ที่จะให้ความแนบสนิทพอดี และพวกเขายังเชื่ออีกว่าการที่ไม่ต้องใช้สกรูยึดระหว่างโครงโลหะส่วนบน กับตัวหลัก หรือตัวรากเทียม มีแนวโน้มที่จะกำจัดความเครียดสะสมที่ถูกทำให้เกิดในฟันปลอมร่วมกับรากเทียมโดยการขันสกรูให้แน่น ส่วนฟันปลอมที่ยึดกับรากเทียมโดยใช้ซีเมนต์สามารถทำให้ไม่มีความเครียดตกค้างได้เพราะมีช่องว่าง 25-30 ไมโครเมตรเพื่อที่อยู่สำหรับซีเมนต์ และเป็นแนวคิดที่ใช้กับงานฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติมาเป็นเวลานาน มีงานวิจัยทางห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าฟันปลอมร่วมกับรากเทียมชนิดใช้ซีเมนต์ยึดสามารถปรับปรุงให้ความแนบสนิทดีขึ้นได้เมื่อเปรียบเทียบกับการทำกระสวนขึ้นผึ้ง การเหวี่ยงโครง และใช้การเชื่อมต่อ (solder) ในโครงโลหะชนิดใช้สกรูยึด ซึ่งผลที่ดีขึ้นนี้เกิดทั้งในแนวแกน z และแนวการหมุน (Randi และคณะ, 2001)

การขาดความแนบสนิทพอดีของโครงโลหะส่วนบนชนิดใช้สกรูยึด เป็นผลให้เกิดการมีความเค้นไปสะสมมารอบรากเทียมเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดที่ใช้ซีเมนต์ยึด แต่อย่างไรก็ตาม ฟันปลอมชนิดที่ใช้สกรูยึด มีช่องว่างบริเวณขอบของรอยต่อระหว่างรากเทียมกับฟันปลอมน้อยกว่า ฟันปลอมชนิดที่ใช้ซีเมนต์ยึดอย่างมีนัยสำคัญ (Guichet และคณะ, 2000) ช่องว่างบริเวณขอบนี้ไม่ได้เป็นสาเหตุของการผุของตัวหลัก แต่จะเป็นที่กักเก็บของจุลชีพในช่องปาก ซึ่งในฟันปลอมชนิดที่ใช้ซีเมนต์ยึดต้องตระหนักถึงการละลายตัวของซีเมนต์ชนิดชั่วคราว Keith และคณะ (Keith และคณะ, 1999) ได้ศึกษาถึงช่องว่างบริเวณขอบนี้ในฟันปลอมชนิดที่ยึดด้วยสกรู และชนิดที่ยึดด้วยซีเมนต์ โดยสรุปได้ว่า ฟันปลอมชนิดใช้สกรูยึดมีช่องว่างขนาด 8.8 ± 5.7 ไมโครเมตร ส่วนฟันปลอมชนิดที่ใช้ซีเมนต์ยึด มีค่า 57.4 ± 20.0 ไมโครเมตร ในกลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ และ 67.4 ± 15.9 ไมโครเมตร ในซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ไม่ได้ศึกษาถึงซีเมนต์ชนิดชั่วคราว ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในยึดฟันปลอมชนิดรองรับโดยรากเทียม (Chiche และ Pinault, 1991)

ตามที่มีรายงานว่าเชื้อจุลชีพในช่องปากสามารถเข้ามาอาศัยอยู่ในช่องว่างระหว่างตัวหลักกับโครงโลหะส่วนบนที่ใช้สกรูยึด Keller และคณะ (Keller, Bragger และ Mombelli, 1998) ได้แสดงถึงลักษณะการยึดไม่ว่าจะเป็นการใช้สกรู หรือซีเมนต์ มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยในทางจุลชีววิทยา และทางคลินิก ซึ่งข้อสรุปนี้ทำการทดลองบนรากเทียมระบบ ITI (Straumann Institut, Waldenburg, Switzerland) Quirynen และ van Steenberghe (Quirynen และ Van Steenberghe, 1993) ก็ให้ข้อสรุปเช่นเดียวกันนี้บนรากเทียมระบบ Branemark อย่างไรก็ตามพวกเขาชี้ให้เห็นว่าช่องว่างภายในรากเทียมนั้นเป็นแหล่งกักเก็บเชื้อจุลชีพ ซึ่งมันจะถูกปล่อยออกมาในร่องเหงือก และรบกวนการรักษาการอักเสบรอบรากเทียม (peri-implantitis)

ผลในฟันปลอมที่ขาดความแนบสนิทของโครงโลหะส่วนบนชนิดที่ยึดโดยสกรู เป็นสาเหตุหลักในการเกิดสกรูหลวม และ/หรือสกรูหัก ซึ่งมีการศึกษามากมายที่ติดตามผลระยะยาวสนับสนุนเหตุการณ์นี้ (albrektsson, 1988; Kallus และ Bessing, 1994; Naert และคณะ, 1992b, 1992a; Zarb และ Smith, 1990) ผลอีกอย่างของการที่โครงโลหะไม่แนบสนิทคือรากเทียมหัก (Lekholm และคณะ, 1994) แม้ว่าจะพบไม่บ่อยนักแต่มันก็เกิดถึง 1.5% ของการรักษาด้วยรากเทียมที่ติดตามผล 3-15 ปี (Adell และคณะ, 1981) การหักส่วนมากจะเกิดระหว่างเกลียวที่ 3 และเกลียวที่ 4 ของรากเทียม ซึ่งตรงกับเกลียวล่างสุดของสกรูที่มีการขันอยู่ภายใน (Quirynen และคณะ, 1992) จากที่กล่าวไปนี้จะเห็นได้ว่าความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงนั้นจำเป็นสำหรับการทำฟันปลอมร่วมกับรากเทียม

การยึดติดของฟันปลอมบนรากเทียม

งานฟันปลอมติดแน่นบนรากเทียมนั้นแบ่งตามการยึดติดได้เป็น 2 ประเภทคือ

ฟันปลอมชนิดยึดด้วย ซีเมนต์ (cement retained prostheses)

ฟันปลอมชนิดยึดด้วย สกรู (screw retained prostheses)

บางบริษัทผู้ผลิตรากเทียมแนะนำให้ใช้ สกรูในการยึดฟันปลอมให้ติดกับรากเทียมเป็นทางเลือกแรก เนื่องจากเฉพาะฟันปลอมที่ใช้สกรูยึดกับรากเทียมเท่านั้นที่สามารถถอดออกได้ เพื่อทำการตรวจสอบ และดูแลรักษา การยึดติดด้วยสกรูนั้นตัวสกรูสามารถหลวมหลุดได้ และครอบฟันไม่สัมผัสกับรากเทียม ซึ่งเหตุการณ์นี้จะช่วยป้องกันแรงที่มากเกินไปที่มากกระทำกับตัวรากเทียม ซึ่งเหตุผลนี้มองข้ามไปหลายประการ มีรายงานมากมายที่แสดงถึงอายุการใช้งานของฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ พบว่าอายุเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10-15 ปี (Libby และคณะ, 1997; Walton, Gardner และ Agar, 1986) ในทางตรงข้ามรากเทียมที่รองรับฟันปลอมติดแน่นแสดงถึงอัตราการอยู่รอด (survival rate) มากกว่า 90% (Adell และคณะ, 1981) ซึ่งเหตุการณ์ที่ทำให้ฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติล้มเหลว และต้องทำการรักษาใหม่ส่วนมากมักเกิดจากฟันผุ (Libby และคณะ, 1997; Walton และคณะ, 1986) และรองลงมาคือความสัมพันธ์กับการรักษารากฟัน ซึ่งตัวหลักรากเทียมนั้นไม่มีการผุ และไม่ต้องรักษารากฟัน เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติถึงมีอายุสั้นกว่าฟันปลอมติดแน่นบนรากเทียม ทันตแพทย์ที่เลือกใช้ฟันปลอมชนิดยึดกับรากเทียมด้วยสกรู โดยมีเหตุผลว่าสามารถถอดออกมาดูแลรักษา และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้นั้นจริงๆ แล้วฟันปลอมที่ถูกตัดสินว่าต้องถอดออกมาเพื่อแก้ปัญหา ต้นเหตุของปัญหาก็มาจากสกรูที่ใช้นั่นเอง ซึ่งจากประสบการณ์ทางคลินิก การศึกษากรณีศึกษา และการวิจัยในรากเทียม ชี้ให้เห็นว่า อัตราการเกิดปัญหา เกิดกับฟันปลอมติดแน่นชนิดยึดกับรากเทียมด้วยสกรูเป็นส่วนมาก เมื่อกระบวนการรักษามีการพัฒนามากขึ้น ความเข้าใจถึงข้อดีของฟันปลอมที่ยึดด้วยซีเมนต์ ทำให้มีแนวโน้มไปทางการใช้ฟันปลอมติดแน่นบนรากเทียมด้วยซีเมนต์มากขึ้น (Misch, 1993)

ข้อได้เปรียบของฟันปลอมติดแน่นชนิดที่ใช้ซีเมนต์ยึด

เมื่อเปรียบเทียบฟันปลอมติดแน่นชนิดใช้ซีเมนต์ยึดกับชนิดที่ใช้สกรูยึดข้อได้เปรียบประกอบไปด้วย ความแนบสนิทที่มากขึ้น ปรับปรุงแนวการรับแรง มีความสวยงาม ทำได้ง่ายในฟันหลัง ได้รับแรงอย่างต่อเนื่อง ลดการสูญเสียขอบกระดูก ลดผลข้างเคียง ราคาถูกลงและประหยัดเวลา (Agar และคณะ, 1997; Misch, 1993)

1. ความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง

โครงโลหะที่ไม่แนบสนิทเป็นสาเหตุของสกรูหลวม สูญเสียขอบกระดูก ส่วนประกอบของรากเทียมหัก รากเทียมโยก การให้แรง 20 นิวตัน/เซนติเมตร กับสกรูจะทำให้โครงโลหะที่ไม่แนบสนิทเกิดการบิดเบี้ยวของโครงโลหะส่วนบน กระดูก และส่วนประกอบของรากเทียม

แรงที่เกิดอย่างต่อเนื่องต่อส่วนประกอบของรากเทียมจะทำให้เกิดการคืบ (creep) กับทั้งระบบ เกิดความล้ากับวัสดุต่างๆและตัวกระดูก ซึ่งรากเทียมไม่สามารถคาดการณ์ถึงการเคลื่อนที่ในกระดูกได้ แต่การได้รับแรงอย่างต่อเนื่องจากโครงโลหะที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดการชดเชยในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระดูก ทำให้บริเวณของกระดูกที่ได้รับแรงมากเกินไปจะเกิดเป็นพยาธิสภาพ และมีการละลายของกระดูกตามมา

ฟันปลอมชนิดที่ใช้สกรูยึดไม่สามารถทำให้เกิดความเหมาะสมโดยแท้จริงได้ (Carr และ Stewart, 1993; Quirynen และคณะ, 1990) โดยฟันปลอมที่ใช้สกรูยึดทำให้เกิดความเครียดสะสมอยู่ในรากเทียมมากกว่าฟันปลอมที่ใช้ซีเมนต์ยึด 2-3 เท่า มีปัจจัยมากมายที่ไม่สามารถควบคุมได้ในการที่จะทำให้เกิดความเหมาะสมอย่างเที่ยงตรง เช่นการหดตัวของวัสดุพิมพ์ปากขณะก่อตัว ปูนขยายตัว กระสวนซี่ฝังปิดตัวระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและการปักสกรู อีสเวสเมนต์ขยายตัว โลหะหดตัว (Carr และ Stewart, 1993; Lindstrom และ Preiskel, 2001; Linke, Nicholls และ Faucher, 1985; Pietrabissa และคณะ, 2000; Preston และ Berger, 1977) โครงโลหะส่วนบนมีขนาดใหญ่และหนาในฟันปลอมร่วมกับรากเทียมมากกว่าในฟันธรรมชาติ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของตัวหลักรากเทียม และกระดูกที่สูญเสียไปจะถูกทดแทนด้วยขนาดฟันปลอม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมิติในระหว่างกระบวนการผลิตโครงโลหะมีความสัมพันธ์กับขนาดของโครงโลหะ (Schiffleger และคณะ, 1985) และความไม่เหมาะสมในส่วนประกอบของรากเทียมขึ้นกับจำนวนส่วนประกอบที่ใช้ระหว่างกระบวนการผลิต (Tan และคณะ, 1993) ทำให้ฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมมีการบิดเบี้ยวในช่วง 291-357 ไมโครเมตร ในระหว่างกระบวนการผลิตฟันปลอม

ความเหมาะสมของขอบ และระดับการยอมรับความสามารถของเครื่องกลึงในการผลิตให้รอยต่อเหมาะสม (machine tolerance) มีความแตกต่างกันระหว่างตัวหลักกับรากเทียมจำลองและตัวหลักรากเทียมจริง (Binon, 1995) การหดตัวของพอสเลน และอะคริลิก มีความสัมพันธ์กับปริมาณ ซึ่งอาจจะทำให้โครงโลหะบิดเบี้ยวได้ ในระหว่างขั้นตอนการทำฟันปลอม ตัวหลักกับรากเทียมอาจมีหลวมและขยับทำให้ฟันปลอมที่ได้ไม่เหมาะสมแต่ถูกขันสกรูลงไป ซึ่งต่อมาเกิดสกรูหลวมและหักได้ (Clelland และ van Putten, 1997)

โครงโลหะที่ใส่ลงบนตัวหลักได้พอดีเป็นข้อได้เปรียบของฟันปลอมชนิดยึดด้วยซีเมนต์ เพราะมีการทำ die spacer หนาประมาณ 40 ไมโครเมตร เพื่อเป็นที่อยู่ของซีเมนต์จะช่วยชดเชยความเปลี่ยนแปลงทางมิติระหว่างขั้นตอนการทำโครงโลหะได้ และช่องว่างของซีเมนต์นี้สามารถหาจนถึงบริเวณขอบของชิ้นงานได้เนื่องจากรากเทียมไม่มีการผูกและซีเมนต์จะทำหน้าที่เสมือนส่วนเติมเต็ม (Clelland และ van Putten, 1997) และถ้าครอบฟันที่ใช้ซีเมนต์ยึดนี้ใส่ไม่ลงบนตัวหลักรากเทียม สามารถรอกแก้ไขที่ตัวหลัก หรือภายในผิวด้านในของครอบฟันได้เล็กน้อย ในขั้นตอน

การลองฟัน แต่ถ้าเป็นฟันปลอมชนิดที่ใช้สกรูยึดไม่สามารถทำได้ ซึ่งต้องตัดโครงโลหะและเชื่อมใหม่ หรือพิมพ์ปากทำใหม่ตั้งแต่ต้น การตัดโครงโลหะต้องมีขนาดช่องว่างระหว่างโครงโลหะที่เพียงพอในการเชื่อมต่อ (0.008 นิ้ว) เพื่อให้ได้โครงโลหะที่แนบสนิทกับตัวหลักรากเทียม ถ้าช่องว่างมากเกินไปจะทำให้วัสดุที่นำมาใช้เชื่อมหลุด และข้อต่ออ่อนแอได้ แต่ถ้าช่องว่างเล็กเกินไปจะทำให้โครงบิดเบี้ยวจากการขยายตัวระหว่างให้ความร้อนของโครงโลหะ (Willis และ Nicholls, 1980)

2. ช่องว่างระหว่างตัวหลักและครอบฟัน

ในฟันปลอมชนิดที่ใช้สกรูยึดไม่มีการปิดรอยต่อระหว่างขอบของตัวหลักกับครอบฟัน ทำให้เป็นที่เก็บกักของเชื้อโรคในบริเวณนี้ และส่งเสริมให้เกิดการเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ในร่องเหงือก (Jansen, Conrads และ Richter, 1997; Quirynen และคณะ, 1994) ซึ่งเมื่อเปิดรอยต่อนี้ออกมาจะมีกลิ่นเหม็นซึ่งพบได้บ่อย การใช้ซีเมนต์มาช่วยปิดรอยต่อนี้ทำให้เชื้อจุลินทรีย์แทรกซึมเข้าไปไม่ได้ แม้ว่าจะมีซีเมนต์ละลายไปบ้างแต่ช่องที่เกิดจากการละลายนี้รับได้ในทางคลินิก และไม่ได้เป็นสาเหตุของการระคายเคืองเหงือก (Keith และคณะ, 1999)

ข้อดีของครอบฟันที่ใช้สกรูยึดคือไม่มีซีเมนต์ในร่องเหงือก ที่เป็นสาเหตุให้เนื้อเยื่อรอบรากเทียมอักเสบ และนำไปสู่การเกาะติดของคราบจุลินทรีย์ และการอักเสบ เช่นเดียวกับครอบฟันบนฟันธรรมชาติ (Agar และคณะ, 1997) ซึ่งในกรณีที่ขอบของครอบฟันอยู่ได้เหงือกมากๆ จะยากที่จะกำจัดซีเมนต์ออกหมด

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมากระบวนการต่างๆ มีแนวโน้มว่าฟันปลอมติดแน่นร่วมกับรากเทียม 90% จะใช้ซีเมนต์ในการยึด ซึ่งเปลี่ยนจากแต่ก่อนที่เป็นสกรู (Chee และคณะ, 1999; Keith และคณะ, 1999)

วัสดุพิมพ์ปาก

วัสดุพิมพ์ปากที่ใช้ในงานทันตกรรมรากเทียมคือวัสดุประเภท อีลาสโตเมอร์ (elastomers) วัสดุนี้ประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ หรือสายโพลิเมอร์มาเชื่อมต่อกันเพื่อสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งคุณสมบัติยืดหยุ่นของตัวมันทำให้โพลิเมอร์สามารถยึดได้รั้งหนึ่งจากนั้นจะคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมตอนเริ่มแรก โครงสร้างการเชื่อมต่อของสายโพลิเมอร์นี้เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ อันได้แก่ พฤติกรรมการยืดหยุ่นและความแข็งแรงของวัสดุ

วัสดุอีลาสโตเมอร์ที่มักจะนำมาใช้ในปัจจุบันมี 4 ชนิด ได้แก่ โพลีซัลไฟด์ (the sulfide polymers) ซิลิโคนชนิดคอนเดนเซชัน (the condensation-polymerizing silicones) ซิลิโคนชนิดแอดดิชัน (the addition-polymerizing, polyvinyl siloxane) และโพลีอีเทอร์ (the polyethers) ซึ่ง

การจำแนกประเภทอีลาสโตเมอร์โดย American Dental Association ใช้คุณสมบัติความยืดหยุ่น และการเปลี่ยนแปลงทางมิติ

คุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงในการใช้วัสดุเหล่านี้ได้แก่

-ระยะเวลาการก่อตัว โดยปกติแล้วระยะเวลาที่แนะนำโดยบริษัทนั้นมักจะสั้นเกินไป การรอเวลาเพิ่มอีกจะทำให้เพิ่มโอกาสความสำเร็จในงานมากขึ้น

-รายละเอียดและความแม่นยำในการลอกเลียน ซึ่งวัสดุพิมพ์ในปัจจุบันให้ความละเอียดที่มากในการลอกเลียน ซึ่งการควบคุมการใช้วัสดุจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก

-การเปลี่ยนรูปร่างการบิดเบี้ยวที่เกิดระหว่างการนำรอยพิมพ์ออกจากช่องปากจะน้อยมาก ถ้ารอยพิมพ์ถูกดึงออกอย่างรวดเร็ว

แต่ข้อเสียหลักของวัสดุเหล่านี้คือคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำของมัน ดังนั้นจึงแนะนำให้พยายามขจัดน้ำ และความชื้นต่างๆออกก่อนที่จะทำการพิมพ์ ข้อเสียอีกประการที่ต้องคำนึง คือ ความเสี่ยงต่อการเป็นพิษของวัสดุเมื่อทำการพิมพ์โดยตรงบนกระดูก หลังขั้นตอนการผ่าตัดทันตที่มีการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุพิมพ์เหล่านี้มีโอกาสยับยั้งการทำหน้าที่ของเซลล์ได้ และอาจจะมีพิษอย่างอื่นร่วมด้วย (Sydiskis และ Gerhardt, 1993) และโพลีอีเทอร์นั้นควรหลีกเลี่ยงที่จะพิมพ์ลงไปบนขั้นตอนผ่าตัด

วัสดุทั้ง 4 ชนิดนี้สามารถใช้ในการพิมพ์ได้อย่างดี แต่โดยทั่วไปแล้วการใช้วัสดุพิมพ์ที่มีลักษณะ putty หรือ heavy body ร่วมกับการใช้ light body จะดีกว่า เนื่องจาก การใช้วัสดุที่มีความหนืดต่ำจัดรอบตัวหลักจะลดการเก็บกักฟองอากาศ และใช้วัสดุที่หนืดมากกว่าทับลงไป เพื่อให้ความแข็งแรงกับรอยพิมพ์ในการรองรับส่วนประกอบต่างๆ (Block, Kent และ Guerra, 1997)

เมื่อจะพิมพ์รากเทียมโดยใช้วิธีพิมพ์โดยตรง วัสดุพิมพ์จะต้องมีคุณสมบัติ 2 อย่างที่ต้องการคือ แข็งแรงพอที่จะคงไว้ซึ่งตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอดเมื่อตัวหลักถูกต่อเข้าด้วยกัน และมีการเคลื่อนที่บิดเบี้ยวของตัวหลักจำลองน้อยเมื่อเทียบกับในช่องปาก เมื่อมองความแข็งแรงคือปริมาณของ แรงบิด (torque) ที่ต้องใช้ในความพยายามที่จะหมุนตัวต่อยอดถ่ายทอดในวัสดุพิมพ์ชนิดต่างๆ Liou และคณะ (Liou และคณะ, 1993) กล่าวว่าวิธีพิมพ์โดยอ้อมนั้นไม่สามารถใส่ตัวต่อยอดถ่ายทอดลงที่เดิมได้ ไม่ว่าจะใช้ ซิลิโคน หรือโพลีอีเทอร์ในการพิมพ์ปาก ข้อสรุปนี้เป็นจริงเช่นเดียวกับวิธีพิมพ์โดยตรงที่เกิดการหมุนของตัวต่อยอดถ่ายทอด ดังนั้น สามารถลดการเกิดการเคลื่อนที่เหล่านี้ได้โดยใช้วัสดุพิมพ์ที่มีความแข็งแรงมาก Barrett และคณะ (Barrett และคณะ, 1993) ศึกษาเรื่องความคลาดเคลื่อน ไม่พบว่ามีความแตกต่างกันในการพิมพ์โดยตรงด้วยโพลีอีเทอร์ หรือ แออดิชั่นแนลซิลิโคน และมีอีกหลายรายงานที่สรุปผลเช่นเดียวกัน (Daoudi และคณะ, 2001; Liou และคณะ, 1993) ถึงแม้ว่าจะมีหลายวัสดุพิมพ์ถูกผลิตออกมาในหลายความเข้มข้น

ก็มีรายงานการศึกษามากมายกล่าวถึงการเปรียบเทียบความแข็งแรง ความแม่นยำในแต่ละชนิดของวัสดุ ในวัสดุที่มีความยืดหยุ่นต่ำเช่นโพลีเอเทอร์ ถูกแนะนำให้เป็นวัสดุพิมพ์สันเหงือกกว้างที่มีการใช้รากเทียมหลายตัวในการรองรับ (Assif และคณะ, 1992; Goll, 1991; Hsu, Millstein และ Stein, 1993; Phillips และคณะ, 1994) แต่ถ้าฟันหลักมีขนาดเล็กมากต้องระวังการใช้โพลีเอเทอร์ เพราะอาจทำให้แบบจำลองหักขณะที่จะออกจากรอยพิมพ์ได้ ส่วนแอตดิชันแนลซิลิโคนแนะนำให้ใช้กับวิธีพิมพ์โดยตรง (Barrett และคณะ, 1993; Schneider และ Wee, 1996)

ถาดพิมพ์ปาก

มีการศึกษาเปรียบเทียบความแม่นยำของวัสดุพิมพ์และถาดพิมพ์ปากสำเร็จรูปชนิดพลาสติก กับถาดพิมพ์ปากชนิดทำเองบนพื้นหลักที่ผ่านการหล่อแต่ง (Boulton และคณะ, 1996; Gordon, Johnson และ Drennon, 1990; Millstein, Maya และ Segura, 1998; Wassell และ Ibbetson, 1991) หลายรายงานสรุปว่าแบบจำลองที่ได้จากถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลมีความแม่นยำมากกว่าถาดพิมพ์ปากชนิดสำเร็จรูป (Gordon และคณะ, 1990; Millstein และคณะ, 1998; Rueda และคณะ, 1996; Wassell และ Ibbetson, 1991) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลมีความแข็งแรงและไม่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของรอยพิมพ์ (Wassell และ Ibbetson, 1991) อย่างไรก็ตามได้มีการแสดงให้เห็นว่าความหนาที่แตกต่างกันของวัสดุพิมพ์ปากชนิดยืดหยุ่นสามารถลดความแม่นยำของรอยพิมพ์ที่ได้ (Eames และคณะ, 1979) ถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลสามารถสร้างให้เกิดความหนาของวัสดุพิมพ์ได้อย่างสม่ำเสมอ แต่ยังไม่มีการกำหนดถึงความหนาที่เหมาะสมสำหรับวัสดุพิมพ์ปากชนิดยืดหยุ่น มีหลายรายงานแนะนำให้ใช้ช่องว่างขนาดต่างๆตั้งแต่ 1-5 มิลลิเมตรที่จะให้มีมิติเสถียรภาพมากที่สุดและรอยพิมพ์ที่ได้มีความแม่นยำ (Asgar, 1971; Eames และคณะ, 1979; Fairhurst และคณะ, 1956) Burton และคณะ (Burton, Hood และ Plunkett, 1989) ซึ่งให้เห็นว่าการบิดเบี้ยวของแบบพิมพ์เกิดจากการใช้วัสดุพิมพ์ปากชนิดยืดหยุ่นที่มีความหนืดปานกลางร่วมกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลเกิดขึ้นเหมือนกับถาดพิมพ์ปากชนิดใช้แล้วทิ้ง โดยให้เหตุผลว่าเกิดจากความหนืดของตัววัสดุพิมพ์และความยืดหยุ่นของถาดพิมพ์ปาก อย่างไรก็ตาม Valderhaug และ Floystand (Valderhaug และ Floystand, 1984) รายงานว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความมีมิติเสถียรภาพของรอยพิมพ์ที่ได้จากถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลและถาดพิมพ์ปากสำเร็จรูปเมื่อความหนาของวัสดุพิมพ์อยู่ในช่วง 2-9 มิลลิเมตร

การศึกษาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงทางมิติของถาดพิมพ์ปากมีผลต่อความแม่นยำของวัสดุพิมพ์ มีหลายรายงาน (Goldfogel, Harvey และ Winter, 1985; Shillingburg และคณะ, 1997) แนะนำว่าถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลควรทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาพิมพ์ปาก

และก็มีรายงาน (Fehling, Hesby และ Pelleu, 1986; Pagniano และคณะ, 1982) ที่ศึกษาช่วงเวลาหลังจากทำถาดพิมพ์ปาก ตั้งแต่ 40 นาทีถึง 9 ชั่วโมงมีผลกับความเสถียรภาพของวัสดุ

การพิมพ์ปากพร้อมกันทั้ง 2 ขากรรไกร (dual-arch impression) คือ วิธีการพิมพ์แบบหุบปาก (closed-mouth impression technique) ซึ่งนิยมมากในช่วงปลายปี 1980 ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือประหยัดเวลา และวัสดุ ผู้ป่วยรู้สึกสบาย และง่ายต่อการใช้งาน (Burke และ Crisp, 2001) แต่ข้อเสียคือไม่มีฟันในด้านตรงข้ามของขากรรไกรเดียวกัน ซึ่งชิ้นงานที่ได้อาจจะมียุทธกรรมการสบฟันขณะเยื้องออกด้านข้าง และเพราะว่าวิธีพิมพ์นี้สามารถบันทึกฟันบนฟันล่างและตำแหน่งสบฟันได้พร้อมกันจึงเรียกรูปนี้ว่า triple tray technique มีหลายรายงานกล่าวถึงวิธีใช้เช่นเดียวกับคนแรกคือ Wilson และ Werrin (Wilson และ Werrin, 1983) และอื่นๆ (Kaplowitz, 1997, , 1996) อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์นี้ยังไม่สามารถสรุปได้เนื่องจากมีข้อมูลเพียงเล็กน้อยที่แสดงถึงผลที่ได้จากวิธีพิมพ์นี้

Johnson และ Craig (Johnson และ Craig, 1985; Johnson และ Craig, 1986) แสดงให้เห็นว่าแอคติชั่นแนลซิลิโคนเป็นวัสดุพิมพ์ที่ให้ความแม่นยำอย่างมาก โดยเมื่อใช้ร่วมกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลชนิดทั้งปากจะให้ความแม่นยำสูงสุดและใช้เป็นมาตรฐานในทางคลินิก แต่มีเพียงหนึ่งรายงานเท่านั้นที่ศึกษาถึงความแม่นยำของวัสดุพิมพ์นี้ร่วมกับการพิมพ์ปากพร้อมกันทั้ง 2 ขากรรไกร (Cox, Brandt และ Hushes, 2002) ซึ่งวัดโดยการพิมพ์ 35 รอยพิมพ์ในคนไข้ 1 คน และเป็นสะพานฟัน 3 ซี่ ผลที่ได้คือเกิดความคลาดเคลื่อนไปจากมาตรฐาน อย่างไรก็ตามกระบวนการวัดในการทดลองนี้ยังไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งเป็นไปได้ว่าการคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการวัด มีการศึกษาในทางคลินิกเปรียบเทียบการพิมพ์แบบ 2 ขากรรไกรร่วมกับวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคน 2 ความเข้มข้นกับการพิมพ์ โดยใช้ถาดพิมพ์เฉพาะบุคคลแบบเต็มขากรรไกรที่ละฝั่ง โดยใช้วัสดุพิมพ์ปาก 6 ชนิด (Parker และคณะ, 1997) ผลการทดลองที่ได้ สรุปว่าทั้ง 2 วิธีไม่เกิดความแม่นยำในตำแหน่งสบฟันสนิทมากที่สุด (maximum intercuspation) แต่การพิมพ์แบบพร้อมกันทั้ง 2 ฝั่งมีความแม่นยำในจุดสบมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การพิมพ์พร้อมกันทั้ง 2 ขากรรไกรสามารถใช้ถาดพิมพ์ได้ทั้งชนิดที่เป็นพลาสติกและโลหะ ซึ่งไม่มีข้อมูลที่เป็นหลักฐานว่าแบบใดให้ความแม่นยำกว่ากัน (Ceyhan, Johnson และ Lepe, 2003) มี 1 รายงานเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองที่ได้จากถาดพิมพ์ปาก triple tray ชนิดพลาสติกและโลหะกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลแบบเต็มขากรรไกร ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลมีความแม่นยำน้อยกว่าถาดพิมพ์ปากแบบ 2 ขากรรไกร ในแนวแก้ม-ลิ้น และถาดพิมพ์ปากชนิด 2 ขากรรไกรชนิดที่เป็นโลหะให้ความแม่นยำมากกว่าชนิดอื่นในการวัดระยะทางระหว่างฟัน แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้ไม่ได้คำนึงถึงปัจจัยอื่นๆเช่น แก้มและลิ้น มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความแม่นยำของแบบจำลองที่ได้จากถาดพิมพ์ปากแบบ 2 ขากรรไกรชนิดที่เป็น

พลาสติกและโลหะกับวัสดุพิมพ์ 2 ชนิด (Breeding และ Dixon, 2000) ผลที่ได้สรุปว่า ถาดพิมพ์ปากที่เป็นโลหะให้แบบจำลองที่มีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริงส่วนถาดพิมพ์ที่เป็นพลาสติกแบบจำลองที่ได้จะใหญ่กว่าความเป็นจริง แต่การวิจัยนี้วัดแค่ในแนวแก้ม-ลิ้นเท่านั้นและไม่มีการเปรียบเทียบกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคลชนิดเต็มขากรรไกร และการวิจัยในห้องปฏิบัติการไม่สามารถจำลองแรงสบฟันจากคนใช้ได้ มี 1 รายงานทางคลินิกที่พบว่าการบิดเบี้ยวของรอยพิมพ์ที่ได้จากถาดพิมพ์ปากแบบ 2 ขากรรไกร ถ้าถาดพิมพ์กดอยู่บนสันเหงือก (Barzilay และ Myers, 1987) แต่ไม่มีข้อมูลในรายงานที่กล่าวถึงปริมาณการบิดเบี้ยว ต่อมา Larson และคณะ (Larson, Nielsen และ Brackett, 2002) แสดงหลักฐานให้เห็นว่ามีการบิดเบี้ยวของถาดพิมพ์ปากแบบ 2 ขากรรไกรชนิดที่เป็นพลาสติกเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสกับสันเหงือกโดยใช้แบบจำลองที่มีปุ่มกระดูกขากรรไกรล่าง จาก 3 รายงานที่กล่าวมานั้นสามารถสรุปได้ว่า (Ceyhan, Johnson, Lepe และคณะ, 2003) ถาดพิมพ์ปากแบบ 2 ขากรรไกรชนิดที่เป็นพลาสติกทำให้เกิดแบบจำลองที่มีขนาดเล็กในแนวแก้ม-ลิ้นเมื่อเทียบกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล

เมื่อมีการผลิตชิ้นงานบูรณะบนแบบจำลอง ความคลาดเคลื่อนที่สะสมมาจากแต่ละขั้นตอนทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรง ดังนั้นการเลือกวิธีพิมพ์ปากจึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการสร้างงานฟันปลอมถาวร (Nicholls, 1977; Rueda และคณะ, 1996; Wassell และ Ibbetson, 1991)

กระบวนการการพิมพ์ปาก

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงหลักเมื่อทำงานบูรณะด้วยรากเทียมคือการถ่ายทอดความสัมพันธ์ของตัวรากเทียมและ/หรือฟันธรรมชาติที่เหลืออยู่ไปสู่แบบจำลอง มีหลายทางเลือกในการพิมพ์ตัวรากเทียม เช่นการพิมพ์โดยตรงบนตัวหลักที่ผ่านการหล่อ การใช้ตัวหลักจำลอง หรือการใช้ตัวรากเทียมจำลองร่วมกับตัวต่อยอดถ่ายทอดในแบบจำลอง ซึ่งแต่ละทางเลือกนั้นต้องเลือกวัสดุและวิธีการพิมพ์ให้เหมาะสม การใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดต้องใช้วัสดุพิมพ์ที่มีความยืดหยุ่นเพียงพอในการหลุดออกจากรอยคอด และแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยไม่บิดเบี้ยว วัสดุควรให้การยึดอยู่ที่เพียงพอของตัวต่อยอดถ่ายทอดขณะเทแบบหล่อ ส่วนการพิมพ์โดยตรงบนฟันหลักที่กรอแต่นั้นถ้าเกิดตัวหลักมีขนาดเล็กมากอาจจำเป็นต้องใช้วัสดุอื่นในการเทแบบจำลองแทนปูนหินเพื่อป้องกันการหัก

ระบบในการถ่ายทอดระดับรากเทียมนั้นมี 2 แบบ คือการถ่ายทอดที่ระดับตัวหลัก และการถ่ายทอดที่ระดับตัวรากเทียมไปสู่แบบจำลอง อย่างไรก็ตามรากเทียมทุกระบบต้องการการถ่ายด้วยวิธีที่แม่นยำที่สุดเพื่อให้งานฟันปลอมที่ได้มีความแนบกันตัวรากเทียม ในยุคเริ่มแรกการพิมพ์ทำโดยใช้ตัวต่อยอดวางบนตัวหลักแล้วจึงพิมพ์ด้วยถาดพิมพ์ปากทับลงไป แต่มีความคลาดเคลื่อน

มากเนื่องจากตัวต่อยอดมีการขยับ ต่อมาจึงมีการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดที่มีสกรูติด หรือตัวต่อยอดที่มีสกรูแยกชั้นลงบนตัวหลักรากเทียมให้แนบสนิทก่อน แล้วพิมพ์ หลังจากนั้นจึงนำตัวหลักจำลองมาใส่บนตัวต่อยอดอีกทีก่อนเทแบบ หากมีการกรอแต่งตัวหลักจะไม่มีการใช้ตัวหลักจำลองแต่จะทำการพิมพ์ปากเหมือนการทำฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ จากนั้นจึงเทแบบด้วยปูนหิน

รากเทียมหลายระบบออกแบบวิธีพิมพ์ให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำโดยพิมพ์ที่ระดับรากเทียม แทนที่จะเป็นระดับตัวหลักเช่นแต่ก่อน โดยตัวต่อยอดถ่ายทอดจะถูกใส่ลงบนตัวรากเทียม พิมพ์ปาก จากนั้นจึงนำตัวรากเทียมจำลองมาใส่บนตัวต่อยอดถ่ายทอด แล้วจึงเทแบบจำลอง ซึ่งวิธีนี้จะได้น้ำเยื่อรอบรากเทียมด้วย ซึ่งต้องใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นร่วมในการเทแบบ วิธีนี้มักใช้ในบริเวณที่ต้องการความสวยงามมาก เพราะสามารถสร้างตัวหลักให้มีขนาดที่เหมาะสมกับเนื้อเยื่อรอบๆได้ในห้องปฏิบัติการ และไม่ต้องกรอตัวหลักที่ยึดกับรากเทียม เป็นการลดอันตรายที่เกิดจากความร้อน การสัมผัสเพื่อนที่ไม่เหมาะสมอันมีโอกาที่จะเป็นอันตรายต่อรอยต่อระหว่างผิวรากเทียมกับกระดูก

สามารถแบ่งการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมตามลักษณะการยึดติดของตัวต่อยอดถ่ายทอดในวัสดุพิมพ์ปากได้ 2 วิธี (Assif และคณะ, 1994; Goll, 1991)

1. วิธีพิมพ์โดยอ้อม (indirect technique)

วิธีการนี้ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยอ้อม (indirect transfer coping) ลักษณะมีหลากหลายตามบริษัทผู้ผลิต โดยนำมายึดติดกับตัวรากเทียมด้วยสกรูซึ่งติดกับตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยอ้อม ภายหลังจากการพิมพ์ปากและดึงแบบพิมพ์ออกจากช่องปาก ตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยอ้อมยังคงติดกับตัวรากเทียมอยู่ในช่องปาก ต้องคลายสกรูเพื่อนำตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยอ้อมออกมาเชื่อมต่อกับตัวรากเทียมจำลอง (implant body analog) หรือส่วนตัวรากเทียมและตัวหลักจำลอง (abutment analog) แล้วนำส่วนประกอบนี้กลับไปใส่ในขอบพิมพ์ก่อนเทแบบจำลอง Liou และคณะ (Liou และคณะ, 1993) แนะนำว่าวิธีนี้ควรใช้กับผู้ป่วยที่เข้าปากได้น้อย ไม่สามารถใส่แกนของตัวต่อยอดถ่ายทอด พร้อมทั้งตัวชั้นสกรูพร้อมกันได้ ผู้ป่วยที่จาเจียนได้ง่าย และเหมาะกับฟันหลังที่พิมพ์ปากลำบาก

2. วิธีการพิมพ์โดยตรง (direct technique)

วิธีการนี้ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยตรง (direct transfer coping) ยึดติดกับตัวรากเทียมในช่องปากด้วยสกรูซึ่งแยกออกได้ ถ้ายหลังจากการพิมพ์ปากและวัสดุพิมพ์แข็งตัวจึงคลายสกรูออกเมื่อดึงแบบพิมพ์ออกจากช่องปาก ตัวต่อยอดถ่ายทอดโดยตรงจะติดมากับแบบพิมพ์ ซึ่งตัวต่อยอดนี้จะถ่ายทอดตำแหน่งตัวรากเทียม โดยมีตัวรากเทียมจำลอง มาเชื่อมต่อกับตัวต่อยอดถ่ายทอดก่อนนำไปเทแบบจำลอง บางระบบแนะนำให้มีการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด ก่อนการพิมพ์ปาก Branemark และคณะ แนะนำให้เชื่อมตัวต่อยอดเข้าด้วยกันภายในปาก ด้วย

อะคริลิกเรซิน ดูราเลย์ (Reliance Dental Mfg., Worth, Ill.) โดยใช้ไหมขัดฟัน หรือลวดจัดฟันเป็นโครง Carr เสนอว่าการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันโดยใช้ อะคริลิกเรซิน เพื่อจุดประสงค์ที่ว่าป้องกันการหมุนของตัวต่อยอดถ่ายทอดขณะที่กำลังขันตัวหลักจำลองลงไป Loos (Loos, 1986) อธิบายว่า การใช้ลวดจัดฟันเชื่อมกับตัวต่อยอดถ่ายทอดด้วยอะคริลิกเรซิน ดูราเลย์ จะป้องกันแรงบิดของตัวต่อยอดถ่ายทอดในขั้นตอนการพิมพ์ปาก และขั้นตอนการขึ้นส่วนประกอบต่างๆเข้าด้วยกัน ส่วน Assif (Assif และคณะ, 1994) แนะนำให้เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์ Moon และคณะ (Moon และคณะ, 1978) ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเที่ยงตรงของการเชื่อมต่อกับปริมาณอะคริลิกเรซินที่ใช้เป็นตัวยึด (index) พบว่าการเพิ่มปริมาณอะคริลิกเรซินจะทำให้ความเที่ยงตรงของตัวยึดลดลง Mojon และคณะ (Mojon และคณะ, 1990) รายงานว่าการหลุดตัวจากการก่อตัวของ อะคริลิกเรซิน ดูราเลย์ ที่ 24 ชั่วโมง มีค่า 7.9% และ 80% ของการหลุดตัวเกิดขึ้นภายใน 17 นาที นับตั้งแต่เริ่มผสมที่อุณหภูมิห้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่ากระบวนการพิมพ์ปากมีหลายวิธี และหลายขั้นตอน มีรายงานมากมายถึงกระบวนการนี้ไม่ว่าจะเป็นการพิมพ์ปากโดยตรงหรือโดยอ้อม มีการเชื่อมต่อยอดด้วยหรือไม่ วัสดุพิมพ์ที่ใช้ ชนิดถาดพิมพ์ปากที่ใช้ ซึ่งการวัดผลก็ต่างกันเช่น ใช้การวัดโดยตรงเป็นระยะทาง วัดเป็นมุม วัดช่องว่างระหว่างตัวหลักกับชิ้นงาน รวมไปถึงการวัดความเค้นสะสมโดยใช้ strain gauges จะสรุปเป็นแต่ละด้านไปดังนี้

1. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีพิมพ์โดยตรง และวิธีพิมพ์โดยอ้อม

Daoudi และคณะ (Daoudi และคณะ, 2001) ทำการศึกษาความแม่นยำจากการพิมพ์ปาก 4 กลุ่ม โดยใช้ 2 วิธีพิมพ์ คือวิธีโดยตรง และวิธีโดยอ้อม กับวัสดุพิมพ์ปาก 2 ชนิด คือ ซิลิโคน และโพลีอีเทอร์ ในรากเทียม 1 ตัว สรุปว่า วัสดุพิมพ์ทั้ง 2 ชนิดให้ผลไม่แตกต่างกัน แต่วิธีพิมพ์แบบโดยตรงให้ผลที่ดีกว่าพิมพ์วิธีโดยอ้อมซึ่งอาจจะใส่ตัวต่อยอดถ่ายทอดไม่ลงตำแหน่งเดิมหรือใส่ได้ไม่สุดในรอยพิมพ์

Liou และคณะ (Liou และคณะ, 1993) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใส่ตัวต่อยอดถ่ายทอดลงที่เดิมในการพิมพ์แบบโดยอ้อมของรากเทียมระบบต่างๆ ซึ่งใช้ทันตแพทย์ 5 คนทำการใส่ และใช้วัสดุพิมพ์ 2 ชนิด คือ โพลีอีเทอร์ และซิลิโคน ผลปรากฏว่าไม่มีรากเทียมระบบใด และทันตแพทย์คนใดที่สามารถใส่ตัวต่อยอดถ่ายทอดลงที่เดิมได้ และแม้ว่าจะได้ยินเสียงดัง “ป๊อบ” ก็ไม่ได้แปลว่าใส่ลงถูกต้อง และไม่มีความแตกต่างในสองวัสดุพิมพ์เช่นกัน จึงแนะนำให้ทำการ

ประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง และทดลองความแนบสนิทของโครงทุกครั้งในการทำฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียม

Vigolo และคณะ (Vigolo และคณะ, 2005) ศึกษาวิธีการพิมพ์แบบโดยตรงบนรากเทียมเดี่ยว แต่ใช้ตัวต่อยอด 2 ชนิด คือตัวต่อยอดถ่ายทอดแบบขนาน และตัวหลัก UCLA (gold machined UCLA abutment) แทนตัวต่อยอดถ่ายทอด โดยทำการเป่าทรายและทากาวยึดก่อนที่จะทำการพิมพ์ปาก ผลที่ได้คือ ตัวหลัก UCLA ให้ผลที่แม่นยำกว่า เนื่องจากมีค่าความแปรปรวนน้อย แม้ค่าเฉลี่ยจะไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญก็ตาม และพวกเขายังทำการศึกษาอีกเรื่อง (Vigolo และคณะ, 2000) คือ การเปรียบเทียบความแม่นยำของแบบจำลองรากเทียมเดี่ยว โดยใช้วิธีพิมพ์โดยตรง ซึ่งมี 2 กลุ่มทดลอง คือกลุ่มที่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดแบบปกติ กับอีกกลุ่มคือใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดที่ผ่านการเป่าทรายและทากาวยึดก่อนการพิมพ์ปาก แม้ว่าผลจะไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่กลุ่มที่ทำการเป่าทราย และทากาวยึดร่วม มีค่าความแปรปรวนต่ำกว่า

Cehreli และ Akca (Cehreli และ Akca, 2006) ศึกษาวิธีการพิมพ์ปากกับความคลาดเคลื่อนที่ทำให้เกิดความเครียดสะสมในโครงโลหะส่วนบน โดยแบ่งกลุ่มทดลองเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่ใช้วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับ ตัวต่อยอดถ่ายทอด synOcta วัสดุพิมพ์ โพลีอีเทอร์ กลุ่มที่ 2 และ 3 ใช้วิธีพิมพ์โดยอ้อมร่วมกับตัวต่อยอดถ่ายทอด (synOcta plastic positioning cylinders) วัสดุพิมพ์ โพลีอีเทอร์ และซิลิโคนตามลำดับ ผลพบว่าวิธีพิมพ์โดยอ้อมให้ผลที่ดีกว่า มีความเครียดตกค้างน้อยกว่า เนื่องจากตัวต่อยอดถ่ายทอด (synOcta plastic positioning cylinders) ระบบนี้เป็นการนำเอาข้อดีของวิธีโดยตรงและโดยอ้อมมาผสมกัน

Akca และ Cehreli (Akca และ Cehreli, 2004) ทำการศึกษาความแม่นยำของวิธีพิมพ์ปาก 2 วิธี คือ วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม ในรากเทียมระบบ ITI โดยแบ่งกลุ่มทดลองเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่ใช้วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับ ตัวต่อยอดถ่ายทอด synOcta วัสดุพิมพ์ โพลีอีเทอร์ กลุ่มที่ 2 และ 3 ใช้วิธีพิมพ์โดยอ้อมร่วมกับตัวต่อยอดถ่ายทอด (synOcta plastic positioning cylinders) วัสดุพิมพ์ โพลีอีเทอร์ และซิลิโคนตามลำดับ จากนั้นนำไปเทแบบจำลองแล้ววัดระยะ ผลปรากฏคือไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ และสรุปผลว่าการใช้ซิลิโคนในถาดพิมพ์ปากสำเร็จรูปด้วยวิธีพิมพ์โดยอ้อมก็ให้ผลได้ดีเท่ากับวิธีพิมพ์โดยตรงในรากเทียมระบบ ITI

Barrett และคณะ (Barrett และคณะ, 1993) ศึกษาความแม่นยำของ 6 วิธีพิมพ์ปากบนรากเทียมโดยใช้การวัดระยะทางในรอยพิมพ์โดยตรง ซึ่งแบ่งกลุ่มโดยใช้ ตัวต่อยอดถ่ายทอดแบบสอปพิมพ์โดยอ้อม และใช้วัสดุพิมพ์ปาก 2 ชนิด คือ อัลจินเนต กับซิลิโคน และอีกกลุ่มใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดแบบสลิ้มพิมพ์โดยตรง และใช้วัสดุพิมพ์ปาก 4 ชนิด คือ ปูนพลาสเตอร์ โพลีอีเทอร์ ซิลิโคน และใช้ซิลิโคนร่วมกับการเชื่อมต่อ ผลที่ได้พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การใช้ตัวต่อยอดแบบสอปพิมพ์โดยอ้อมมีความคลาดเคลื่อนในแนวตั้งมากที่สุด และ

ความคลาดเคลื่อนจากการต่อตัวหลักจำลองเข้ากับตัวต่อยอดมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า
ขั้นตอนอื่นมาก ผลที่ได้โดยรวมจึงไม่แตกต่างกัน อีกทั้งการทากาวยึดบนสภาพพิมพ์ปากเฉพาะ
บุคคลจะรบกวนทิศทางการหดตัวทำให้วัสดุหดเข้าหาสภาพพิมพ์ปาก แต่ว่ากลุ่มที่ใช้พลาสติก
พิมพ์ก็หดเข้าหาสภาพพิมพ์เช่นกัน แสดงว่าความคลาดเคลื่อนน่าจะมาจากกระบวนการทำ
มากกว่า

2.การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเชื่อมต่อตัวต่อยอดถ่ายทอด

Assif และคณะ (Assif และคณะ, 1999) ศึกษาความแม่นยำของการพิมพ์ปากด้วยวิธี
พิมพ์โดยตรงร่วมกับการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกัน โดยใช้วัสดุต่างๆ ได้แก่ อะคริลิกเร
ซิน ชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง อะคริลิกเรซินชนิดบ่มตัวได้ 2 แบบ และปูนพลาสติก พบว่าการใช้
อะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยตัวเอง และการใช้ปูนพลาสติกให้ความแม่นยำมากที่สุด เนื่องจากก่อตัว
และแข็งก่อนทำการพิมพ์ ส่วน อะคริลิกเรซินชนิดบ่มตัวได้ 2 แบบนั้นคลาดเคลื่อนมาจากการบ่ม
ตัวไม่สมบูรณ์ (Shillingburg และคณะ, 1997) โดยภายหลังการบ่มตัว 24 ชั่วโมงยังมีพันธะคูที่
เป็นอิสระเหลืออยู่ 25-45% อีกทั้งการหดตัวของมันต่อเนื่องในขณะพิมพ์ปากทำให้เกิดความเค้น
สะสมในรอยต่อของวัสดุพิมพ์ปากและตัวเรซิน (O'Brien, 1997a) อีกทั้งความเข้มแสง ทิศทางการ
ฉายแสงยังมีผลกับความแนบสนิทของตัวเรซินกับตัวต่อยอดถ่ายทอดอีกด้วย (Tjan,
Castelnuovo และ Shiotsu, 1997)

Naconecy และคณะ (Naconecy และคณะ, 2004) ศึกษาความแม่นยำในการพิมพ์ปาก
บนรากเทียม 3 วิธีคือ วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด และไม่เชื่อม ส่วนอีก
วิธีคือการพิมพ์โดยอ้อม วัสดุพิมพ์ที่ใช้ คือโพลีอีเทอร์ ผลที่ได้คือ วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการ
เชื่อมต่อให้ผลดีที่สุด ส่วนการไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด กับวิธีพิมพ์โดยอ้อมนั้นให้ผลไม่ต่างกัน
ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเชื่อมต่อจะให้เสถียรภาพของตัวต่อยอดถ่ายทอดได้มากขณะขันสกรูตัวหลัก
จำลองให้ติดกัน และลดการหมุนอย่างอิสระในวัสดุพิมพ์ปาก (Assif และคณะ, 1999; Burawi
และคณะ, 1997)

Carr และ Master (Carr และ Master, 1996) ทำการศึกษาความเที่ยงตรงของ
แบบจำลองที่ได้จากวิธี "verification cast" และแบบจำลองที่ได้จากการพิมพ์โดยตรงร่วมกับการ
เชื่อมตัวต่อยอดเข้าด้วยกันด้วยก้านโลหะและ อะคริลิกเรซิน กลุ่มที่ใช้ verification cast คือ
แบบจำลองที่ผ่านการแก้ไขโดยการตัดและเชื่อมโครงโลหะที่ถูกระงับกับตัวหลักด้วย
อะคริลิกเรซิน ชนิดหดตัวน้อยจากการบ่มตัวในปาก แล้วจากนั้นจึงนำมาแก้ตำแหน่งตัวหลัก
จำลองในแบบจำลอง ผลที่ได้คือแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการเชื่อมต่อ มีความ
แม่นยำมากกว่า เนื่องจาก วิธี verification cast อะคริลิกที่ใช้เชื่อมไม่แข็งแรงพอ

Assif และคณะ (Assif และคณะ, 1992) ศึกษาวิธีพิมพ์ปาก 4 วิธี คือวิธีพิมพ์โดยตรง ร่วมกับการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสี่เหลี่ยม วัสดุพิมพ์ คืออัลจินต์ และโพลีเอเทอร์ พิมพ์ โดยตรงโดยไม่มีการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสี่เหลี่ยม วัสดุพิมพ์ คือโพลีเอเทอร์ และอีกกลุ่ม คือวิธีพิมพ์โดยอ้อมร่วมกันตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสอบ วัสดุพิมพ์คือ ซิลิโคน ผลที่ได้คือการเชื่อม ตัวต่อยอดเข้าด้วยกันให้ผลดีที่สุดโดยไม่ขึ้นกับวัสดุพิมพ์ ส่วนวิธีพิมพ์โดยอ้อมผลที่ได้ไม่สามารถรับ ได้ทางคลินิก

Kim และคณะ (Kim และคณะ, 2006) ศึกษาความคลาดเคลื่อนของส่วนประกอบของ รากเทียมตั้งแต่พิมพ์ปากจนถึงเป็นแบบจำลองโดยใช้วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการเชื่อม และไม่ เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด สรุปผลว่าการต่อส่วนต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับตัวหลัก หรือตัวหลักจำลอง เกิดความคลาดเคลื่อนมากที่สุดใ้กระบวนการพิมพ์ ส่วนกลุ่มที่ไม่มีการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด เข้าด้วยกันให้ความแม่นยำขณะพิมพ์มากกว่า แต่เกิดความคลาดเคลื่อนขณะเทแบบจำลองสูง กว่าการเชื่อมตัวต่อยอดเข้าด้วยกัน เนื่องจากการขยายตัวของปูนไม่ได้รับการต้าน ซึ่งรวมทุก ความคลาดเคลื่อนแล้วผลไม่แตกต่างกัน การทดลองนี้ใช้เครื่อง coordinate measuring machine (CMM) วัดผลออกมาเป็นพิกัด (x,y,z) โดยใช้ค่าที่จุดศูนย์กลางของรากเทียม แต่เนื่องจาก จุดเริ่มต้น (0,0,0) ถูกวางไว้บนรากเทียมตัวจริงสุด ทำให้มีข้อเสียคือถ้าหากรากเทียมตัวนี้ขยับจะ ทำให้แปรผลทั้งหมดผิดไปจากความจริง

Burawi และคณะ (Burawi และคณะ, 1997) ศึกษาเปรียบเทียบความเที่ยงตรงทางมิติ ของการพิมพ์ปากด้วยวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกัน ของรากเทียมระบบ Bone-Lock ผลที่ได้คือการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกัน เกิด ความคลาดเคลื่อนมากกว่าการไม่เชื่อม และความคลาดเคลื่อนที่พบคือการหมุนรอบแกน ตามยาวของรากเทียมในกลุ่มที่มีการเชื่อมต่อ ที่เป็นเช่นนี้เพราะต่อต่อยอดที่ใช้ไม่มีส่วนด้านการ หมุนขณะขันสกรู แต่ในตัวต่อยอดถ่ายทอดกลุ่มที่ไม่ได้เชื่อม มีส่วนนี้ และไม่ต้องใช้วิธีการขันลง ไปในรอยพิมพ์

Herbst และคณะ (Herbst และคณะ, 2000) ศึกษาวิธีการพิมพ์รากเทียม 4 วิธี คือการใช้ ตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสอบร่วมกับวิธีพิมพ์โดยอ้อม ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสี่เหลี่ยมร่วมกับ วิธีพิมพ์โดยตรงแบบไม่เชื่อมต่อ ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสี่เหลี่ยมร่วมกับวิธีพิมพ์โดยตรงแบบ ไม่เชื่อมต่อแต่มีส่วนยื่นออกไปด้านข้างของตัวต่อยอด ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดชนิดสี่เหลี่ยมร่วมกับ วิธีพิมพ์โดยตรงแบบเชื่อมต่อด้วยอะคริลิกเรซิน พบว่าไม่มีวิธีใดที่ให้ความแม่นยำ 100% แต่ พอเพียงเพราะความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า 30 ไมโครเมตร ไม่สามารถตรวจพบได้ในทางคลินิก (Assif และคณะ, 1992) ซึ่งเป็นจุดที่ใช้แยกทางคลินิกระหว่างโครงโลหะที่รับได้กับรับไม่ได้ แม้จะ มีความต่างทางสถิติบ้างในแต่ละกลุ่มแต่ความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดที่วัดได้มีค่าเพียง 0.31%

Hsu และคณะ (Hsu และคณะ, 1993) ศึกษาการพิมพ์โดยตรง 4 วิธี คือ กลุ่มที่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันโดยใช้อะคริลิกเรซินอย่างเดียว อะคริลิกเรซินร่วมกับไหมขัดฟัน อะคริลิกเรซินร่วมกับลวดจัดฟัน และกลุ่มที่ไม่มีการเชื่อมต่อ ผลที่ได้ไม่พบความแตกต่างทั้งในกลุ่มที่ทำการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดและกลุ่มที่ไม่ได้เชื่อม ปริมาณอะคริลิกเรซิน ดูราเลย์ ไม่มีผลกับความแม่นยำในการถ่ายทอด

กระบวนการวัด

การวัดความแม่นยำและความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงของกระบวนการพิมพ์ปากไปจนถึงเป็นแบบจำลองมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละการศึกษาก็มีการเลือกใช้ต่างกันไป สรุปได้ดังนี้

การใช้กล้องไมโครสโคปวัดความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 มิติในแนวแกน x, y, z และมุมที่มีการหมุนไปตามแนวแกน z (θ) (Akca และ Cehreli, 2004; Barrett และคณะ, 1993; Burawi และคณะ, 1997; Daoudi และคณะ, 2001; Herbst และคณะ, 2000; Hsu และคณะ, 1993; Liou และคณะ, 1993; Vigolo และคณะ, 2005; Vigolo และคณะ, 2000)

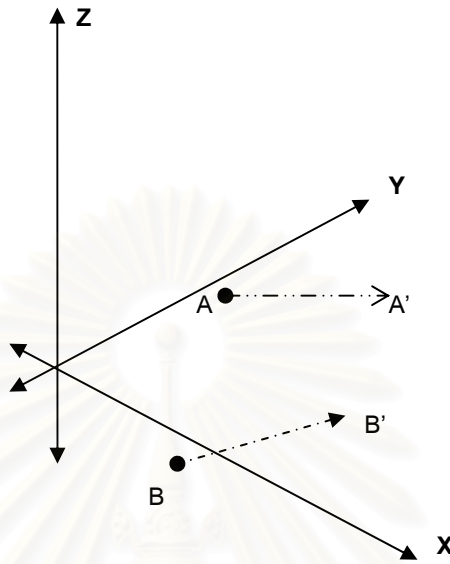
การใช้ strain gauges ในการวัดความเค้น และความเครียดสะสมที่เกิดขึ้นภายในโครงโลหะ ซึ่งเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนในขั้นตอนต่างๆ และความไม่แนบสนิทอย่างเที่ยงตรง (Assif และคณะ, 1992; Assif และคณะ, 1999; Cehreli และ Akca, 2006; Inturregui และคณะ, 1993; Karl และคณะ, 2006; Karl และคณะ, 2004; Naconecy และคณะ, 2004; Nissan และคณะ, 2001)

วัดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนประกอบ 2 ชิ้น เช่นโครงโลหะส่วนบน กับตัวหลักรากเทียมที่ไม่แนบสนิทอย่างเที่ยงตรง (Burns และคณะ, 2003; Romero และคณะ, 2000; Wise, 2001)

ใช้กระบวนการวิเคราะห์รูปถ่าย วีดีโอเลเซอร์ และใช้คอมพิวเตอร์กำหนดจุดพิกัด วัดและคำนวณจุดเหล่านี้เพื่อค่ามุมที่คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงในแบบจำลอง (Akca และ Cehreli, 2004; Jemt, 1995; Jemt และ Lie, 1995; Jemt และคณะ, 1996; Lorenzoni และคณะ, 2000; Phillips และคณะ, 1994; Riedy และคณะ, 1997)

การวัดข้อมูลจัดว่าเป็นสิ่งสำคัญมากซึ่งจะใช้ในการเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของตัวเลขที่ได้ การผิดรูป (distortion) สามารถพูดได้ 2 ความหมาย คือการผิดรูปโดยแท้จริง (absolute distortion) และการผิดรูปสัมพัทธ์ (relative distortion) Nicholls (Nicholls, 1977, , 1978, , 1980) ได้ให้คำจำกัดความของ 2 คำนี้ว่า

การผิดรูปโดยแท้จริง หมายถึงกระบวนการวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอย่างถาวรของจุดต่างๆ ในรูปของพิกัดซึ่งจุดอ้างอิง (0, 0, 0) ถูกตรึงให้อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการผิดรูปที่เกิดขึ้น

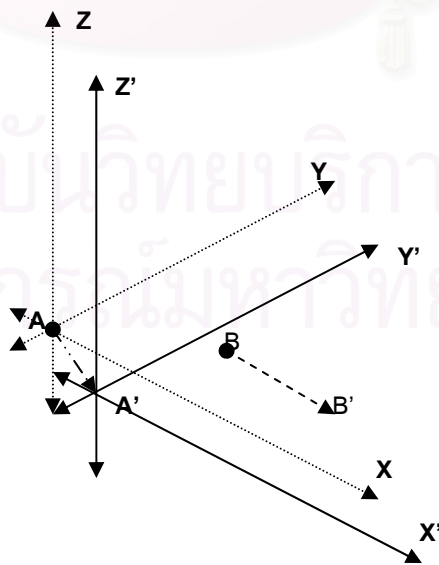


รูปที่ 1 Absolute systems

ที่มา Nicholls J.I., J Prosthet Dent, 1977. 37: p. 587-596.

A และ B เป็นจุดเริ่มต้น ส่วน A' และ B' เป็นจุดที่เกิดขึ้นหลังจากมีการบิดเบี้ยวเกิดขึ้น โดยจะวัดการผิดรูปจากระยะ AA' และ BB'

ส่วนการผิดรูปสัมพันธ์ หมายถึงกระบวนการวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอย่างถาวรของจุดต่างๆ ในรูปของพิกัดเช่นกัน แต่จุดอ้างอิง (0, 0, 0) จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับการผิดรูปที่เกิดขึ้น

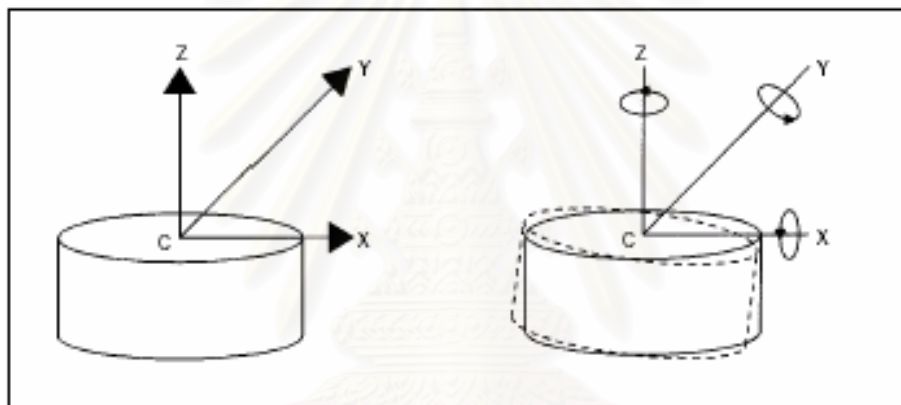


รูปที่ 2 Relative system

ที่มา Nicholls J.I., J Prosthet Dent, 1977. 37: p. 587-596.

จากรูปนี้ระยะการเคลื่อนที่ BB' จะไม่ถือว่าเป็นการเคลื่อนที่ของจุด B เพราะเนื่องจากจุดอ้างอิง A เราไม่พิจารณา โดยจะมองว่าจุด A ไม่มีการเคลื่อนที่ และจุด B จะบันทึกว่ามีการเคลื่อนที่อย่างไรเมื่อเทียบกับจุด A ซึ่งการวัดการผิดรูปแบบนี้จะนำไปใช้ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของจุดอ้างอิงไม่เกิดอันตราย เช่นการเชื่อมต่อ (solder) ในงานสะพานฟันติดแน่น หรือในกรณีที่ เราไม่สามารถนำจุดอ้างอิงไปไว้ภายนอกการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากระบบนี้จะถูกจำกัดเป็นอย่างมากเนื่องจากจุดอ้างอิงมีการเปลี่ยนตำแหน่งไป

ความคลาดเคลื่อน (misfit) ของวัตถุทรงกระบอก เช่นรากเทียม เป็นส่วนหนึ่งของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง ดังนั้นจุดพิกัดจึงถูกนำมาใช้ในการพิจารณา และยังรวมไปถึงค่าของมุมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวต่างๆด้วย ซึ่งองศาอิสระ (degrees of freedom) มีถึง 6 ค่า คือ จุดพิกัด x, y, z และ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$



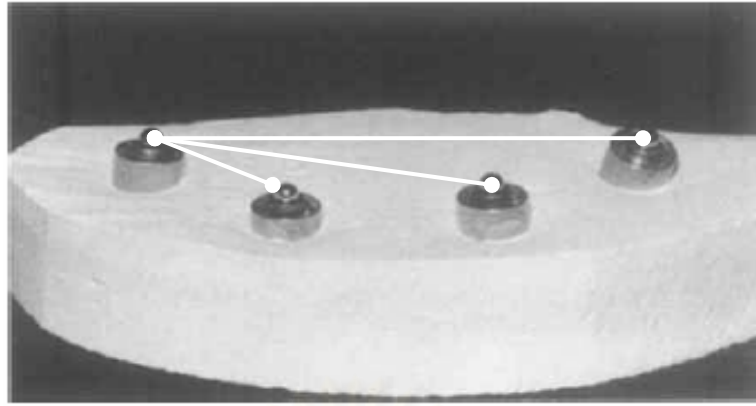
รูปที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน

ที่มา Mulcahy C., et al., Int J Oral Maxillofac Implants, 2000. 15: p. 111-118.

จากรูป แสดงถึงการเคลื่อนที่ในแนวแกน x, y, z (translation) และการหมุนในแนวแกน x, y, z (rotation)

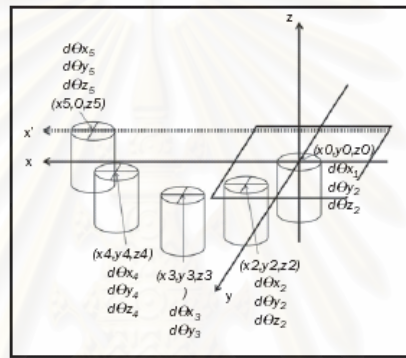
การวัดแบบจำลองต่างๆสามารถแบ่งสิ่งที่จะทำการวัดได้เป็น 2 แบบได้แก่ ความสัมพันธ์ของวัตถุ และ มิติของวัตถุ

1. ความสัมพันธ์ของวัตถุ คือการวัดวัตถุตั้งแต่ 2 สิ่งขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร เช่นระยะห่าง มุมความเอียง หรืออาจกำหนดเป็นจุดพิกัด



รูปที่ 4 แสดงระยะห่างระหว่างรากเทียม

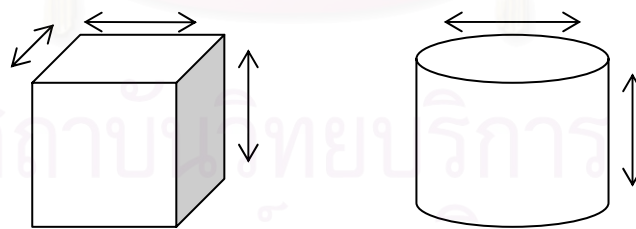
ที่มา Carr A.B., J Prosthodontics, 1996. 5: p. 248-252.



รูปที่ 5 จุดพิกัดแสดงตำแหน่งรากเทียม และมุมเฉียง

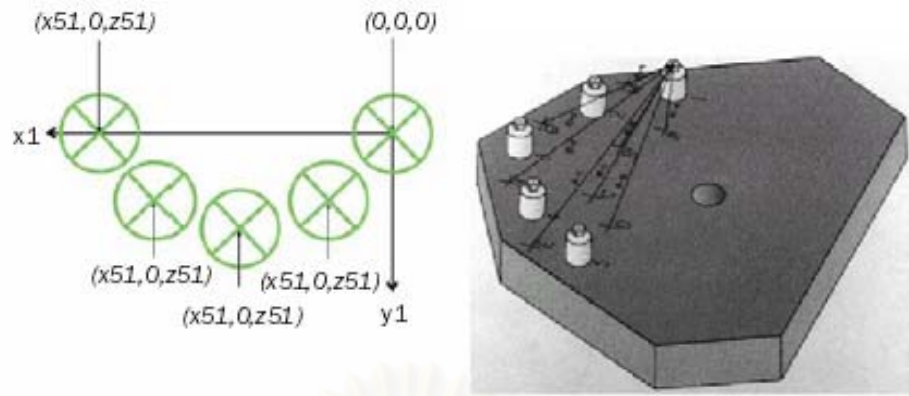
ที่มา Kim S., Int J Oral Maxillofac Implants, 2006. 21: p. 747-755.

2. มิติของวัตถุ คือการวัดขนาดของวัตถุ ความกว้าง ความยาว ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นต้น ดังรูป



รูปที่ 6 แสดงขนาดของวัตถุ

สำหรับแบบจำลองรากเทียมการวัดความสัมพันธ์ของจุดต่างๆ จากการศึกษที่ผ่านมาสามารถพิจารณาได้ 2 แบบคือ ความสัมพันธ์ระหว่างรากเทียม กับรากเทียม และความสัมพันธ์ระหว่างรากเทียมกับสิ่งแวดล้อม เช่น ฟันซี่ข้างเคียง



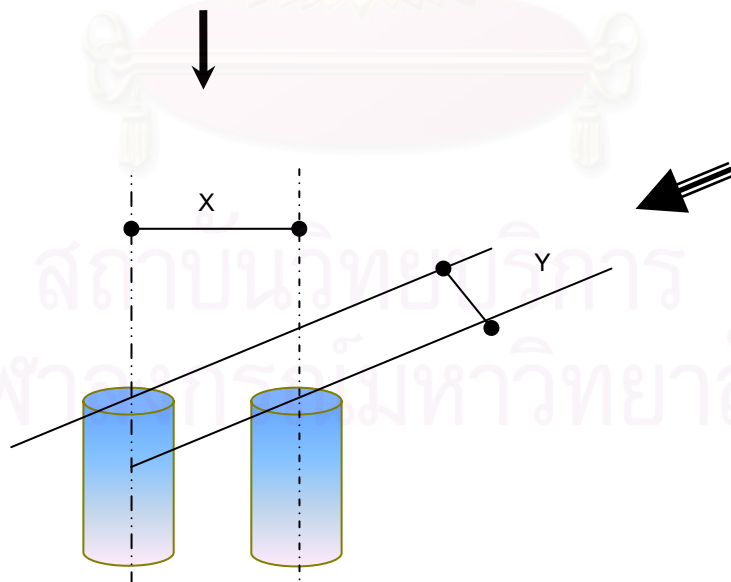
รูปที่ 7 แสดงจุดอ้างอิงต่างๆ

ที่มา Kim S., Int J Oral Maxillofac Implants, 2006. 21: p. 747-755. (ซ้าย)

Herbst D., J Prosthet Dent, 2000. 83: p. 555-561. (ขวา)

จากรูป แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างรากเทียมกับรากเทียม (ซ้าย) ความสัมพันธ์ระหว่างรากเทียมกับแบบจำลอง (ขวา)

เครื่องมือที่ใช้สร้างภาพมีได้ทั้งแบบที่เป็น 3 มิติ เช่นเครื่อง Coordinate Measuring Machine (CCM) ซึ่งเก็บข้อมูลในลักษณะ centroid data ร่วมกับ plane data และ 2 มิติ เช่นเครื่อง Measurement Microscope ร่วมกับวิธี Photogrammetric ซึ่งมีข้อเสียอยู่มากในการวางมุมรับภาพ ซึ่งจะเกิดการวัดผลที่ไม่ถูกต้องดังรูป



รูปที่ 8 แสดงผลจากทิศทางการมอง

จากรูป แสดงถึงค่าที่วัดได้จากการมองต่างมุมมีค่าไม่เท่ากัน ($X > Y$) ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในการใช้ เครื่อง measurement microscope

จากที่กล่าวมาพบว่าการวัดควรวัดในลักษณะ 3 มิติ เพื่อที่จะบอกทิศทางการเคลื่อนที่ได้ และจุดอ้างอิง (0,0,0) ไม่ควรอยู่บนตัวรากเทียมเมื่อจะวัดผลจากกระบวนการพิมพ์ เพราะจะมีความคลาดเคลื่อนของจุด (0,0,0) มาเกี่ยวข้องด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการพิมพ์รากเทียม 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดร่วมด้วย วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดและทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์ ซึ่งแต่ละวิธีนั้นจะพิมพ์จากแม่แบบรากเทียมที่ฝังอยู่ในบ่าโลหะ เสมือนว่าแทนผู้ป่วย

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

1. ประชากรเป้าหมาย

แบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ และการพิมพ์โดยใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดทั้งแบบที่ทำการเชื่อมและไม่เชื่อมติดกับถาดพิมพ์

2. ประชากรตัวอย่าง

แบบจำลองที่ทำจากปูนทั้งหมด และแบบจำลองที่มีรากเทียมจำลอง กับตัวหลัก ระบบ Spline ฝังอยู่

3. กลุ่มตัวอย่าง

3.1 แบบจำลองที่ได้จากการพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอด เช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนพื้นฐานธรรมชาติ	10	ชิ้น
3.2 แบบจำลองที่ได้จากการพิมพ์ปากวิธีโดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอด	10	ชิ้น
3.3 แบบจำลองที่ได้จากการพิมพ์ปากวิธีโดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดและเชื่อมติดกับถาดพิมพ์	10	ชิ้น

ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปรอิสระ คือ วิธีการพิมพ์รากเทียม 3 วิธี

ตัวแปรตาม คือ ความเที่ยงตรงของแบบจำลอง

ตัวแปรควบคุม คือ การเตรียมและผสมวัสดุพิมพ์ปาก ปูน และแรงที่ใช้ในการขันสกรูต่างๆ

เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

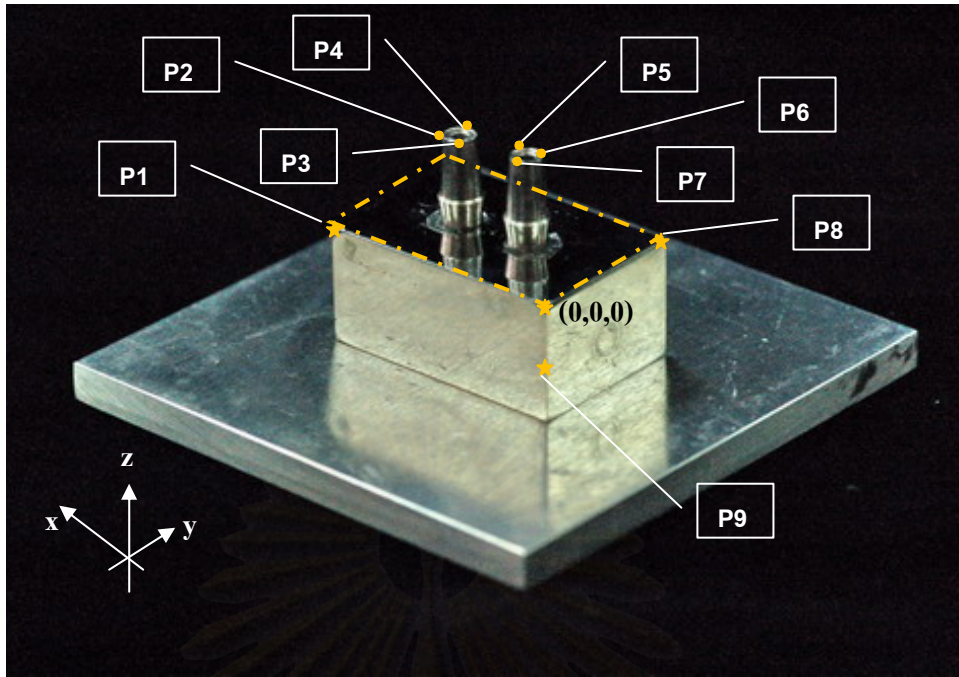
1.ตัวหลัก ระบบ spline (Sulzer Calcitek, Carlsbad, CA)	2	ชิ้น
2.รากเทียม ระบบ spline (Sulzer Calcitek, Carlsbad, CA)	2	ชิ้น
3.รากเทียมจำลอง ระบบ spline (Sulzer Calcitek, Carlsbad, CA)	6	ชิ้น
4.ตัวต่อขยายถอดถ่ายทอด (Sulzer Calcitek, Carlsbad, CA)	6	ชิ้น
5.ซิลิโคน แอดดิชันแนล (Express, 3M ESPE, Germany)	5	ชุด
6.ปูนทันตกรรมชนิดที่ 4 (noritake, Japan)	1	กล่อง
7.กาวเรซิน (UHU quickset, Germany)	1	ชุด
8.อะคริลิกสำหรับทำถาดพิมพ์ปากและโมโนเมอร์ (Lang Dental Manufacturing, Illinois, USA)	1	ชุด
9.อะคริลิกดูราเลย์ (Reliance, Dental.Mfg.Co., USA)	1	ชุด
10.ซีฟิ่งชนิดแผ่น (Dentsply, Detray, England)	1	แผ่น
11.เครื่อง measurement microscope (MEIJI TECHNO CO.,LTD. Japan)	1	เครื่อง
12.เครื่องไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, Japan)	1	เครื่อง

วิธีการทดลอง

การทดลองนี้จะทำการวัดความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีการพิมพ์ 3 วิธี ได้แก่

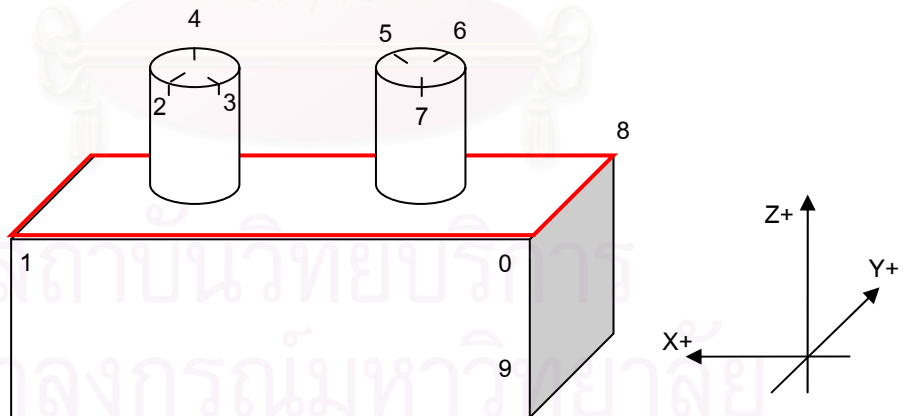
- 1.วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อขยายถอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ
 - 2.วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อขยายถอดถ่ายทอด
 - 3.วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อขยายถอดถ่ายทอดเชื่อมติดกับถาดพิมพ์
- โดยจะทำการพิมพ์รากเทียมจากแม่แบบที่มีการทำจุดอ้างอิงต่างๆไว้เพื่อทำการวัด ดังรูป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 9 แสดงลักษณะแม่แบบ

ตัวหลักแต่ละตัวจะมีรอยบากที่ขอบบน 3 รอย เพื่อแสดงถึงระนาบของตัวหลัก ได้แก่จุดที่ 2,3,4 บนตัวหลักแรกทึ่มตัวที่ 1 และ 5,6,7 บนตัวหลักแรกทึ่มตัวที่ 2 และบนฐานของแรกทึ่มจะมีจุดอ้างอิงอีก 4 จุด 0,1,8,9 ซึ่งใช้แทนระนาบอ้างอิงเพื่อให้แต่ละแบบจำลองสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้และวัดการหดตัวของวัสดุพิมพ์ร่วมกับการขยายของปูน



รูปที่ 10 แสดงโครงร่างและจุดต่างๆบนแม่แบบ

จุดพิกัดที่ใช้ในแต่ละจุดอ้างอิง ได้แก่

- | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $0 = (0,0,0)$ | $1 = (x_1, y_1, z_1)$ | $2 = (x_2, y_2, z_2)$ |
| $3 = (x_3, y_3, z_3)$ | $4 = (x_4, y_4, z_4)$ | $5 = (x_5, y_5, z_5)$ |
| $6 = (x_6, y_6, z_6)$ | $7 = (x_7, y_7, z_7)$ | $8 = (x_8, y_8, z_8)$ |
| $9 = (x_9, y_9, z_9)$ | | |

ค่า x หมายถึง ระยะทางตามแนวแกน x เมื่อวัดจากจุด 0

ค่า y หมายถึง ระยะทางตามแนวแกน y เมื่อวัดจากจุด 0

ค่า z หมายถึง ระยะทางตามแนวแกน z เมื่อวัดจากจุด 0

ระนาบอ้างอิง หมายถึงระนาบหน้าตัดของฐานสี่เหลี่ยม (เส้นสีแดง) ดังแสดงในรูป ซึ่งกำหนดให้ทุกๆแบบจำลองและแม่แบบจะมีพิกัดที่ขนานกันและมีจุด $(0,0,0)$ อยู่ตำแหน่งเดียวกัน เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกันได้

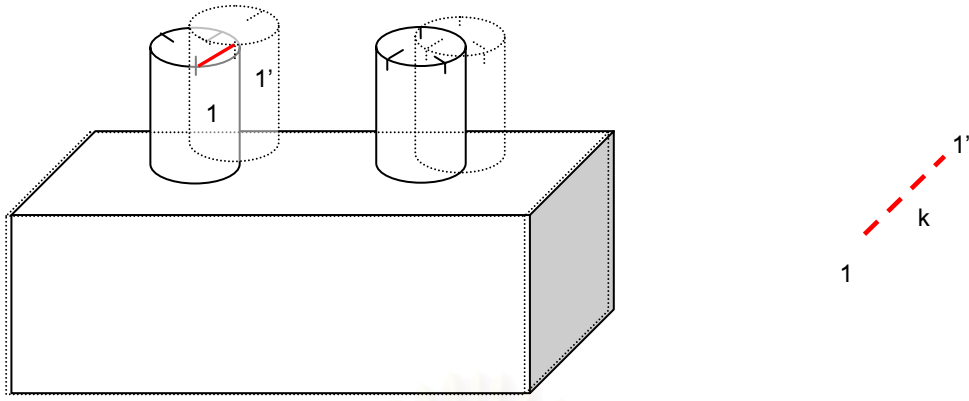
การวัดทั้งหมดทุกพิกัดจะวัดไปทางแกน $+x, +y, +z$ ดังนั้นค่าพิกัดทั้งหมดจึงมีแต่ค่าบวก ส่วนความคลาดเคลื่อนทิศทางขึ้นหรือลง ซ้ายหรือขวา จะแสดงจากตัวเลขที่อ่านได้ เช่น ในแนวแกน Z ขึ้นแม่แบบวัดได้ 15 มิลลิเมตร แบบจำลองวัดได้ 13 มิลลิเมตร แสดงว่าแบบจำลองที่ได้เตี้ยลง 2 มิลลิเมตร แต่ถ้าหากแบบจำลองวัดได้ 18 มิลลิเมตร แสดงว่าแบบจำลองที่ได้สูงขึ้น 3 มิลลิเมตร

เนื่องจากวิจัยนี้จะทำการวัดในลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นเมื่อมองไปในรายละเอียดของแต่ละจุดจะประกอบด้วยค่า 3 ค่าได้แก่ (x,y,z) ซึ่งแต่ละค่านี้จะบอกว่าจุดนั้นอยู่ห่างจากจุด $(0,0,0)$ ไปเป็นระยะทางเท่าไรตามแต่ละแนวแกน ดังนั้นทุกแบบจำลองจะมีจุดอ้างอิง $(0,0,0)$ เหมือนกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันได้

จากที่กล่าวถึงกระบวนการวัด และลักษณะข้อมูลในการวัดไปแล้วนั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดความเที่ยงตรงของแบบจำลอง และแสดงผลในรูประยะทาง ซึ่งการที่จะได้ข้อมูลอย่างครบถ้วนนั้นต้องประกอบไปด้วยข้อมูลสองลักษณะ ได้แก่ ทิศทาง และระยะทาง

ทิศทางนั้นจะบอกถึงตำแหน่ง 3 มิติของขอบนอกด้านบนของตัวหลักรากเทียมเทียบกับจุด $0 (0,0,0)$ โดยจะแสดงออกมาในรูปพิกัด (x,y,z) และแต่ละตัวหลักจะมี 3 จุดอ้างอิงเพื่อแสดงถึงระนาบของขอบนอกด้านบนของตัวหลักรากเทียมใน 3 มิติ ซึ่งจุดทั้ง 3 นี้สามารถนำมาสร้างเป็นกราฟเพื่อใช้แทนระนาบหน้าตัดได้ โดยเมื่อนำแต่ละภาพมาซ้อนทับกันจะสามารถเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ได้จากแต่ละวิธีการพิมพ์นั้นมีการเบี่ยงเบนไปในทิศทางอย่างไร

เนื่องจากแต่ละภาพนั้นบอกทิศทางของการเบี่ยงเบนแล้วยังจำเป็นต้องมีการหาว่าระยะทางที่เบี่ยงเบนไปนั้นมีค่าเท่าไรและแต่ละกลุ่มนั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ จึงต้องใช้ข้อมูลอีกลักษณะหนึ่งคือ สเกล่า ซึ่งบอกถึงขนาดของเวกเตอร์ หรือระยะทางระหว่างจุดว่ามีขนาดมากน้อยเพียงใดในแต่ละกลุ่มทดลอง โดยจะแสดงผลเป็นระยะทางที่มีการเบี่ยงเบนไปของจุดอ้างอิงแต่ละจุดบนระนาบหน้าตัดของตัวหลักรากเทียมระหว่างแม่แบบและแบบจำลอง ดังรูป



รูปที่ 11 แสดงการวัดระยะที่มีการเบี่ยงเบนไปของแบบจำลองจากแม่แบบ

ค่า k คือระยะทางที่มีการเบี่ยงเบนไปของแต่ละจุดอ้างอิง บนหน้าตัดตัวหลักรากเทียม เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง กับแม่แบบ ซึ่งเป็นค่าที่จะนำมาใช้คำนวณทางสถิติว่า แต่ละกลุ่มทดลองมีความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

สาเหตุที่ต้องทำเช่นนี้เพราะว่าสิ่งที่วัดผลในการวิจัยนี้คือความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธีพิมพ์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนคือการเบี่ยงเบนไปของจุดอ้างอิงบนตัวหลักรากเทียมบนแบบจำลองและแม่แบบ พิกัดแต่ละจุดมี 3 ค่า (x,y,z) ซึ่งไม่สามารถนำมาคำนวณทางสถิติได้ทันที ต้องมีการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะทางรวมก่อน

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยมี 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1. การสร้างแม่แบบที่ใช้เป็นกลุ่มควบคุม

ขั้นที่ 2. กระบวนการสร้างสภาพพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล

ขั้นที่ 3. กระบวนการพิมพ์ปากด้วยวิธีต่างๆ ทั้ง 3 วิธี

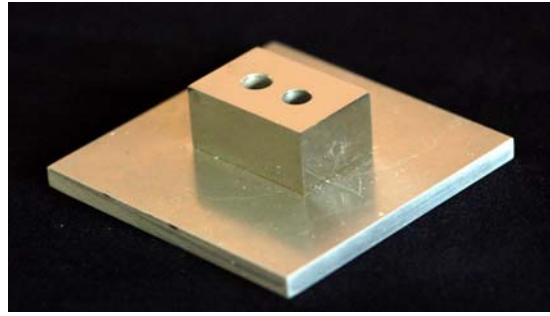
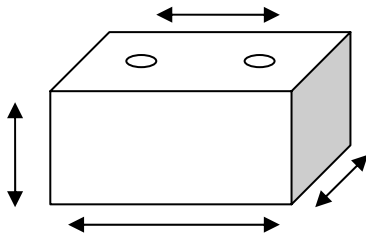
ขั้นที่ 4. กระบวนการเทแบบจำลอง

ขั้นที่ 5. การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการวัดผล

ขั้นที่ 6. กระบวนการวัดผลและแปรผล

ขั้นที่ 1. การสร้างแม่แบบที่ใช้เป็นกลุ่มควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกระบวนการพิมพ์ และวัดผล เสมือนว่าเป็นรากเทียมที่ฝังอยู่ในช่องปากผู้ป่วย 2 อัน

กลึงขึ้นโลหะแม่แบบ ขนาด $26 \times 17 \times 12$ มิลลิเมตร และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร 2 รู ลึก 12 มิลลิเมตร ห่างกัน 4 มิลลิเมตร ผนังด้านในของรูกรอให้เป็นร่องเพื่อเพิ่มการยึดติด

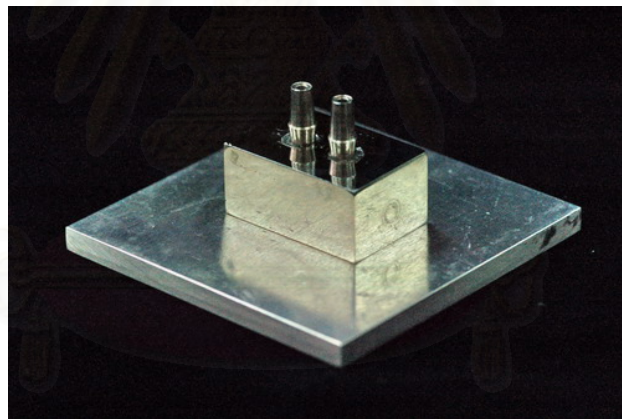


รูปที่ 12 แสดงฐานโลหะของแม่แบบ

นำแผ่นพลาสติกใสมาเจาะรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร 2 รูห่างกัน 4 มิลลิเมตร จากนั้นยึดรากเทียมด้วยสกรูปิดรากเทียมเข้ากันแผ่นพลาสติกเพื่อเป็นตัวควบคุมตำแหน่งรากเทียม

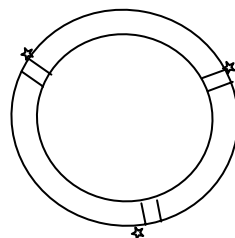
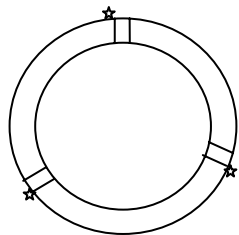
ตัดท่อ PVC เพื่อทำฐานวาง ชุดควบคุมตำแหน่ง สูง 1.6 เซนติเมตร

ผสมกาวเรซินด้วยอัตราส่วนตามบริษัทแนะนำ ทำการเทลงในรู จากนั้นวางชุดควบคุมตำแหน่งและรากเทียมลงในรู และรอเรซินแข็งตัวสมบูรณ์ที่ 72 ชั่วโมง จะได้แบบจำลองที่แทนผู้ป่วยที่มีรากเทียมฝังอยู่ 2 ตัว



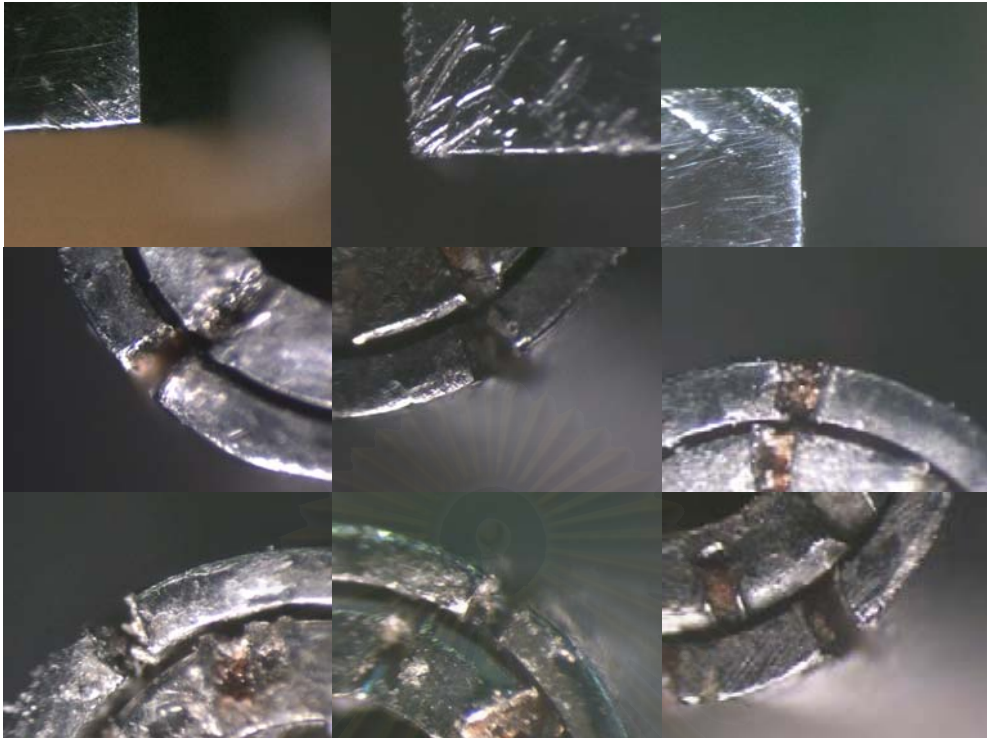
รูปที่ 13 แสดงแม่แบบ

ตัวหลักรากเทียมทำรอยบากที่สันด้านบนเพื่อเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการวัด 3 จุดตั้งรูป เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดว่าระยะของตัวหลักรากเทียมอยู่ที่ใดใน 3 มิติ ซึ่งใช้มีดทำรอยบากภายใต้กล้อง microscope

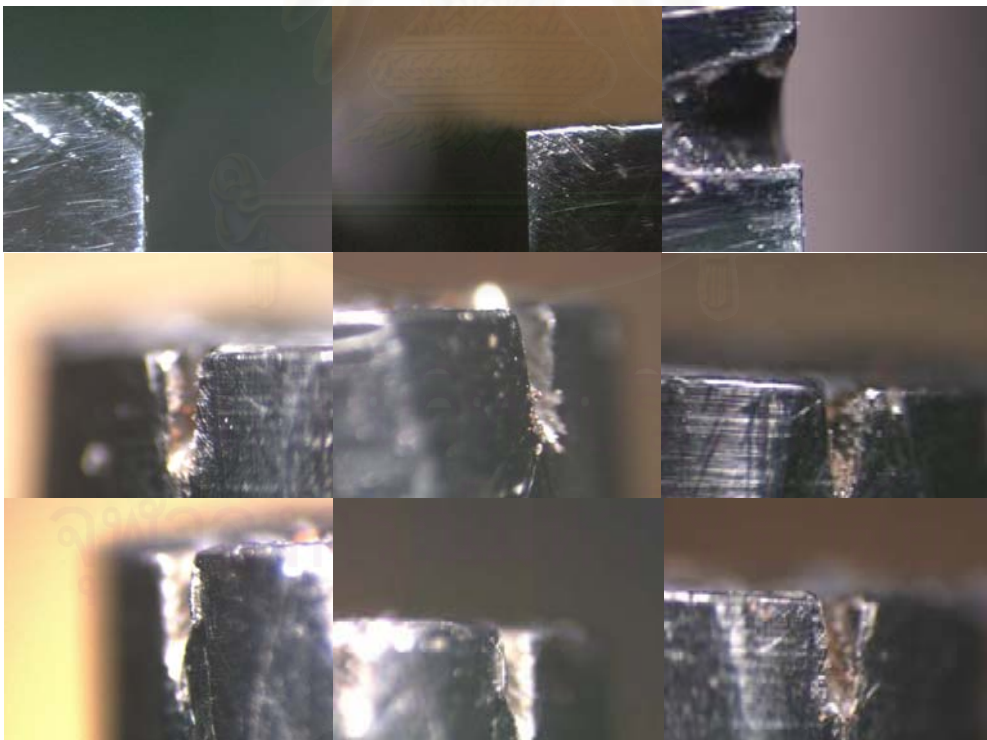


☆ = ตำแหน่งขอบที่ใช้วัด
(จุดอ้างอิงบนตัวหลัก)

รูปที่ 14 แสดงรอยบากที่ใช้เป็นเครื่องหมายบนตัวหลัก

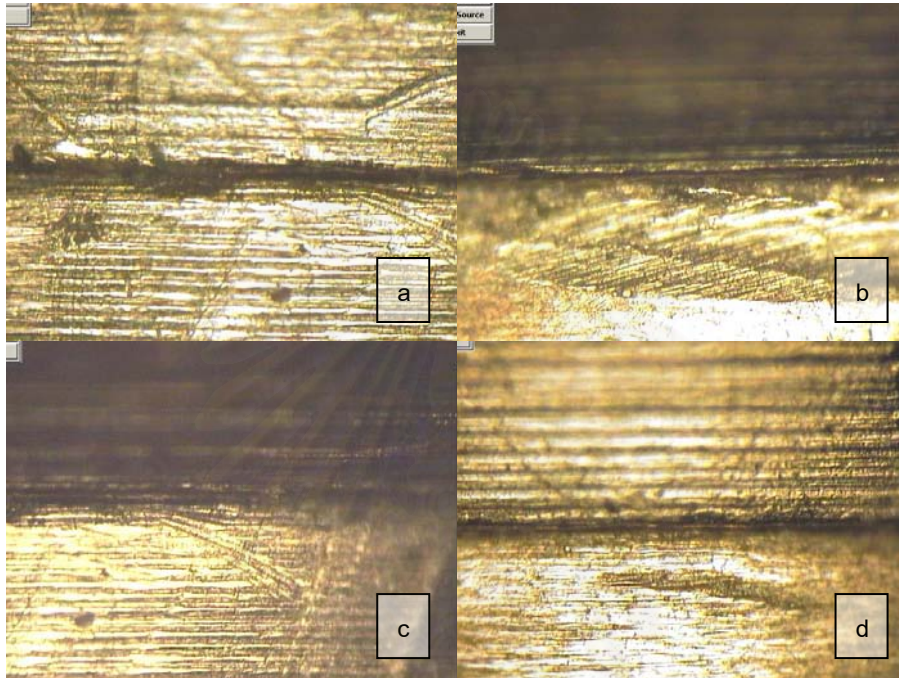


รูปที่ 15 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope ในระนาบ xy



รูปที่ 16 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope ในระนาบ xz

ตรวจสอบรอยต่อระหว่างตัวหลักกับรากเทียม ตัวหลักกับรากเทียมจำลอง ตัวต่อยอด
ถ่ายทอดกับรากเทียม และตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวหลักจำลอง โดยใช้กล้อง measurement
microscope ให้มีความแนบสนิทไม่มีช่องว่างเกิดขึ้น ที่ระดับความละเอียด 1 ไมโครเมตร และใช้
แรงขันเท่าเดิมตลอดการทดลอง (30 นิวตันเซนติเมตร) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการ
ขันส่วนประกอบต่างๆไม่แนบสนิท



รูปที่ 17 แสดงรอยต่อระหว่างส่วนประกอบต่างๆ

(a แสดงรอยต่อระหว่าง ตัวหลักกับรากเทียม, b แสดงรอยต่อระหว่าง ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับราก
เทียม, c แสดงรอยต่อระหว่าง ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียมจำลอง, d แสดงรอยต่อระหว่าง
ตัวหลักกับรากเทียมจำลอง)

ขั้นที่ 2. กระบวนการสร้างสภาพพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล

การสร้างสภาพพิมพ์ปากทำโดย นำซี่ฝังทันตกรรมมาโอบรอบตัวหลักและฐานโลหะ 2 ชั้น
ให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร จากนั้นผสมอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยตัวเองวางทับลงไปบนซี่ฝังให้ได้
ความหนา 2 มิลลิเมตร และมีจุดพักอยู่บนฐานของแม่แบบ ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง เพื่อให้ก่อตัวสมบูรณ์
แล้วจึงเจาะรูโดยรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร แต่ละรูห่างกัน 5 มิลลิเมตรให้เป็นที่ยึด
สำหรับวัสดุพิมพ์ปาก โดยก่อนพิมพ์จะทำการทากาวซิลิโคนและทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 18 แสดงถาดพิมพ์ชนิดเจาะรู

ขั้นที่ 3. กระบวนการพิมพ์ปากด้วยวิธีต่างๆ

ขั้นที่ 3.1 วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อขยายถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

การพิมพ์โดยตรงทำเช่นเดียวกับการพิมพ์ปากในงานพื้นปลอมติดแน่นที่รองรับบนพื้นธรรมชาติ โดยใช้วัสดุพิมพ์ ซิลิโคน แอดดิชันแนล ชนิดความหนืดปานกลาง โดยควบคุมให้อุณหภูมิขณะทำงานของสิ่งแวดล้อมและวัสดุอุปกรณ์คือ 23 องศาเซลเซียส ตลอดจนการทดลอง ผสมจากเครื่องผสมสำเร็จรูปชนิดปั่น (Express, 3M ESPE, Seefeld, Germany) ใส่ในกระบอกฉีด ฉีดไปรอบๆตัวหลัก และใส่ในถาดพิมพ์ปากกดทับลงไปให้จุดพักแนบสนิทกันฐานแบบจำลอง ภายในเวลา 3 นาที ตั้งแต่เริ่มผสม และทุกครั้งของการพิมพ์ปากต้องใช้เวลาเท่ากัน จากนั้นรอ 17 นาที (เวลาที่แนะนำโดยบริษัทคือ 8 นาที แต่กลุ่มที่ทำการเชื่อมตัวต่อขยายถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์ต้องรอ เรซินก่อตัว เป็นเวลา 17 นาทีจึงทำการปรับเวลาให้เท่ากันทุกกลุ่มทดลอง) แล้วจึงดึงออก หลังจากนั้นทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อให้เกิดการคืนกลับ ก่อนที่จะนำไปเทแบบหล่อด้วยปูนหิน ชนิดที่ 4



รูปที่ 19 แสดงวัสดุพิมพ์

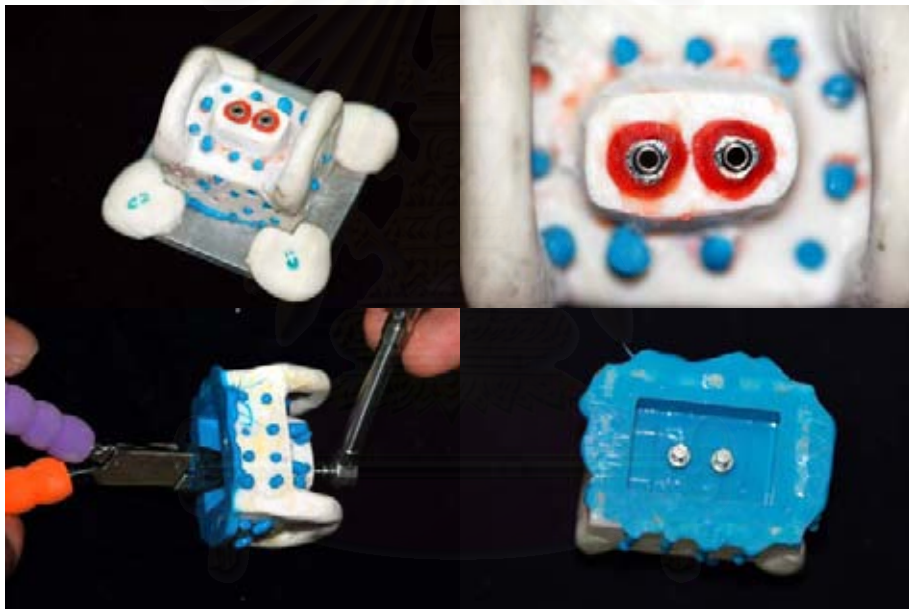
ขั้นที่ 3.2 การพิมพ์วิธีโดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด

การพิมพ์โดยใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมกับรากเทียมจำลอง เริ่มจากใส่ตัวต่อยอดถ่ายทอดลงบนรากเทียม จากนั้นลองนำถาดพิมพ์ปากมาวางและเจาะรูให้เป็นทางสำหรับชั้นตัวต่อยอดถ่ายทอด โดยขอบรูห่างจากตัวต่อยอดถ่ายทอด 0.5 มิลลิเมตร เมื่อลองได้พอดีแล้ว ผสมวัสดุพิมพ์ปากด้วยวิธีเดิม ฉีดรอบๆตัวต่อยอดถ่ายทอด และกดถาดพิมพ์ปากให้จุดพักแนบสนิทกันฐานแบบจำลอง รอจนก้อตัวสมบูรณ์แล้วจึงดึงชั้นสกรูเพื่อคลายตัวต่อยอดถ่ายทอดจากรากเทียม จากนั้นดึงถาดพิมพ์ออก และนำรากเทียมจำลองมาใส่และชั้นสกรูให้ติดกับตัวต่อยอดถ่ายทอด จากนั้นทิ้งไว้ 30 นาที ก่อนนำไปเทแบบจำลองด้วยวิธีเดิม



รูปที่ 20 แสดงขั้นตอนการพิมพ์โดยตรงแบบไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด

ขั้นที่ 3.3 การพิมพ์ปากวิธีโดยตรง และเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดติดกับถาดพิมพ์ การพิมพ์โดยใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมกับรากเทียมจำลอง เริ่มจากใส่ตัวต่อ ยอดถ่ายทอดลงบนตัวรากเทียม จากนั้นลองนำถาดพิมพ์ปากมาวางและเจาะรูให้เป็น ทางสำหรับชั้นตัวต่อยอดถ่ายทอด โดยขอบรูห่างจากตัวต่อยอดถ่ายทอด 0.5 มิลลิเมตร เมื่อลองได้พอดีแล้ว ผสมวัสดุพิมพ์ปากด้วยวิธีเดิม ฉีดรอบๆตัวต่อยอดถ่ายทอด และกด ถาดพิมพ์ปากให้จุดพักแนบสนิทกันฐานแบบจำลอง จากนั้นผสมดูลาเร่เรซินหยอดเชื่อม ตัวต่อยอดเข้ากับถาดพิมพ์ รอจนก่อดตัวสมบูรณ์ เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงดึงชั้นสกรูเพื่อ คลายตัวต่อยอดถ่ายทอดจากตัวหลักรากเทียม จากนั้นดึงถาดพิมพ์ออก และนำตัวราก เทียมจำลองมาใส่และขันสกรูให้ติดกับตัวต่อยอดถ่ายทอด จากนั้นทิ้งไว้ 30 นาที ก่อน นำไปเทแบบจำลองด้วยวิธีเดิม



รูปที่ 21 แสดงขั้นตอนการพิมพ์โดยตรงแบบเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด

ขั้นที่ 4. กระบวนการเทแบบจำลอง

แบบจำลองทั้งหมดทำจากปูนหินชนิดที่ 4 ใช้ปูนใหม่ที่นำมาจากกล่องบรรจุ โดยมี อัตราส่วนในการผสม น้ำ 24 มิลลิลิตร ต่อ ผง 100 กรัม เริ่มจากใส่น้ำในถ้วยผสมก่อนตาม อัตราส่วน จากนั้นจึงใส่ปูนพลาสติกหีนตามลงไป รอ 30 วินาทีให้ปูนจมลงในน้ำ แล้วจึงนำไปใส่ เครื่องผสมชนิดสุญญากาศ บั่นเป็นเวลา 20 วินาที ตามที่บริษัทแนะนำ และนำไปเทลงในรอย พิมพ์ที่ได้ร่วมกับการใช้เครื่องสั่นสะเทือน รอจนปูนก่อดตัวสมบูรณ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงนำออกมา จากรอยพิมพ์



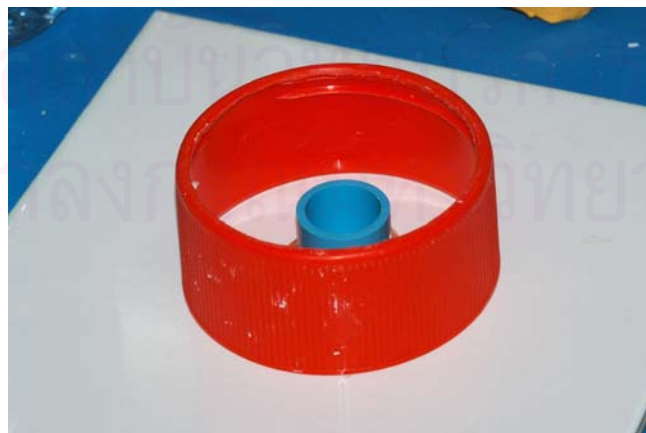
รูปที่ 22 เครื่องผสมปุ๋นและเครื่องสันสะเทือน



รูปที่ 23 แสดงแบบจำลองที่ได้จากแต่ละวิธีพิมพ์

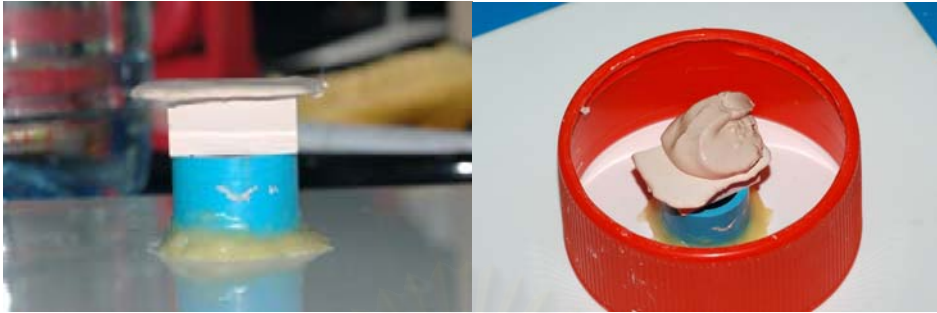
ขั้นที่ 5. การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการวัดผล

เนื่องจากหลังเทปูนลงในรอยพิมพ์ แบบจำลองแต่ละอันจะมีฐานไม่ขนานกันทำให้มีอว้างตั้งแล้วมีระนาบอ้างอิงไม่ขนานกัน จึงจะทำการต่อฐานของแบบจำลองให้มีระนาบอ้างอิงขนานกันทุกชิ้นงานและขนานกับแนวระนาบ โดยใช้ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. สูง 1.5 ซม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม. สูง 3.5 ซม. วางซ้อนกันดังรูป

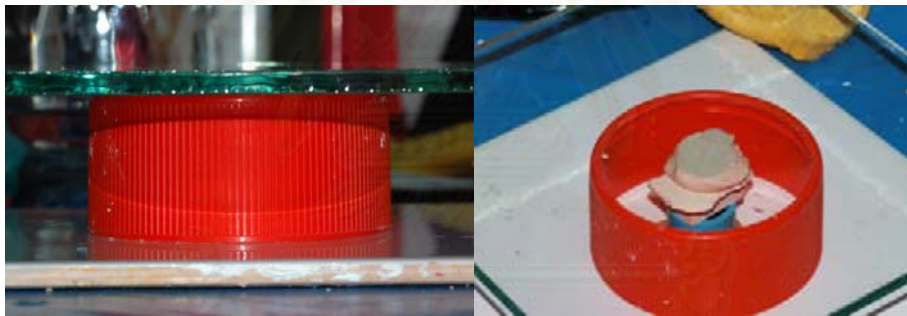
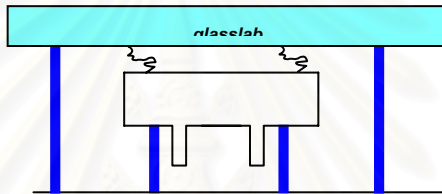


รูปที่ 24 แสดงแทนวางแบบจำลองสำหรับต่อฐาน

วางแผนจำลองคว่ำลงบนท่ออันเล็กแล้วจึงเทปูนลงบนฐาน ดังรูป

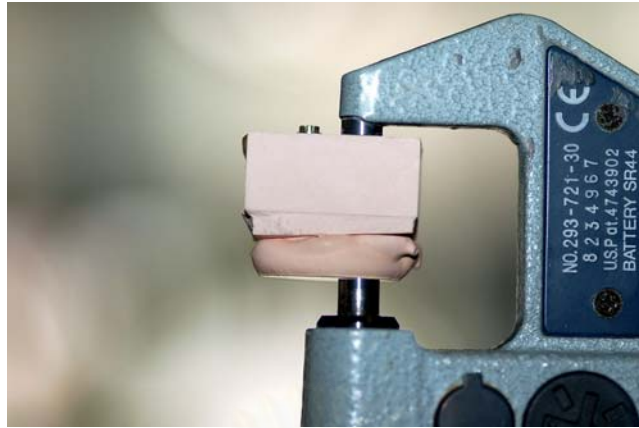


รูปที่ 25 แสดงการต่อฐานแบบจำลอง
จากนั้นวางแผ่นแก้วซ้อนทับลงไปจนแนบสนิท ดังรูป



รูปที่ 26 แสดงการต่อฐานแบบจำลอง

จากนั้นทิ้งไว้ 24 ชม. และทำการตรวจสอบความหนาทั้งสี่มุมของแบบจำลองโดยใช้ไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, Japan) ก่อนนำไปวัดผล ซึ่งทุกแบบจำลองจะต้องมีความหนาที่เท่ากัน และในทุกๆตำแหน่งอยู่ในระนาบเดียวกัน



รูปที่ 27 แสดงการตรวจสอบความหนาของฐาน

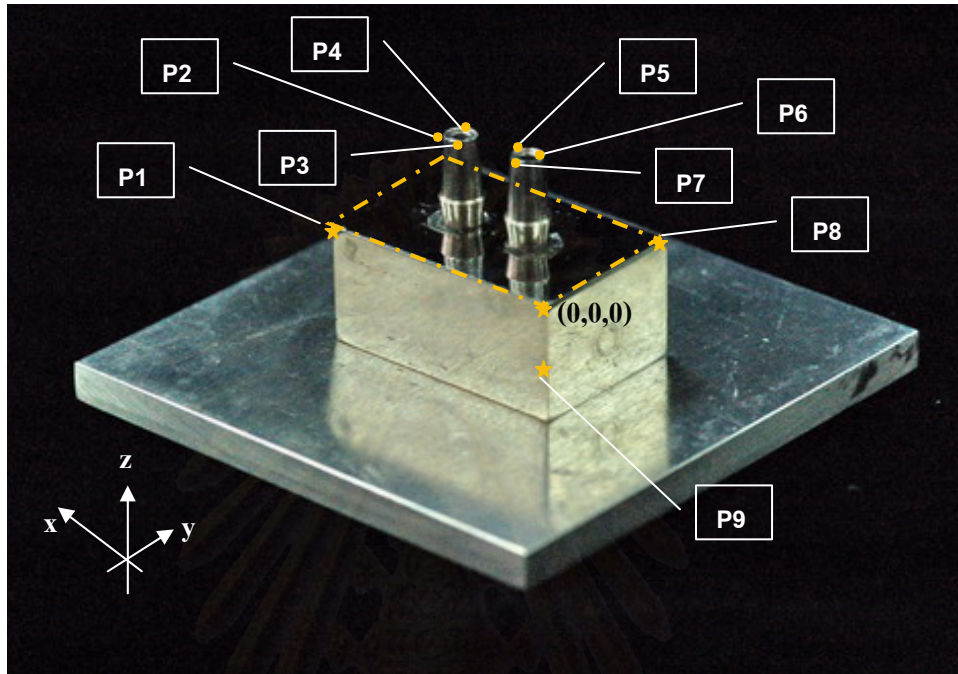
ขั้นที่ 6. กระบวนการวัดผลและแปรผล

เครื่องมือที่ใช้วัดคือ เครื่อง measurement microscope (MEIJI TECHNO CO.,LTD. Japan) กำลังขยายของเลนส์ 50 เท่า (SPlan 5X/0.1 ∞/0) ระดับความละเอียดที่ใช้ในมาตรวัดคือ 1/1000 มิลลิเมตร หรือ 1 ไมโครเมตร ซึ่งการวัดจะมองผ่านเลนส์ และเลื่อนชิ้นแบบจำลองไปยังตำแหน่งต่างๆ จากนั้นอ่านค่าระยะทางที่เลื่อนไปจากกล้อง โดยแต่ละจุดจะทำการวัด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย และจะทำการปรับมาตรฐานของผู้วัดโดยการวัดชิ้นตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบขนาดแน่นอนอยู่แล้ว 5 ครั้งก่อน จนค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 2 ไมโครเมตร เพื่อทดสอบความเที่ยงตรงและแม่นยำในการวัดแบบจำลอง ดังรูป



รูปที่ 28 เครื่อง measurement microscope

เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือนี้คือจะวัดผลข้อมูลได้เพียง 2 มิติ แต่ข้อมูลที่ต้องการเป็นลักษณะ 3 มิติ จึงต้องทำการวัดเป็น 2 มุมมอง คือในระนาบ XY และในระนาบ XZ จากนั้นจึงรวมข้อมูลเป็นพิกัด (x,y,z)

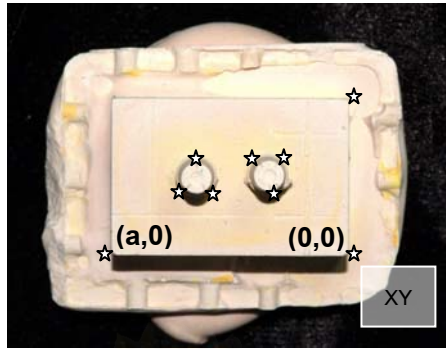


รูปที่ 29 แสดงพิกัดต่างๆบนแบบจำลอง

ขั้นตอนกระบวนการวัดผลนี้จะแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนย่อยดังนี้

- 1 การวัดผลในระนาบ xy
- 2 การหาค่า z เพื่อนำมารวมให้เป็นพิกัด (x,y,z)
- 3 ทหาระยะที่แบบจำลองคลาดเคลื่อนไปจากแม่แบบโดยรวมทุกพิกัดออกมาเป็นระยะทางจริงๆที่เคลื่อนไป
- 4 วิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ส่วน
 - 4.1 สร้างกราฟจากพิกัด (x,y,z) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของข้อมูล
 - 4.2 หานัยสำคัญของความคลาดเคลื่อนจากแต่ละวิธีการพิมพ์ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากข้อ 3
- 5 การวัดการขยายตัวของปูน

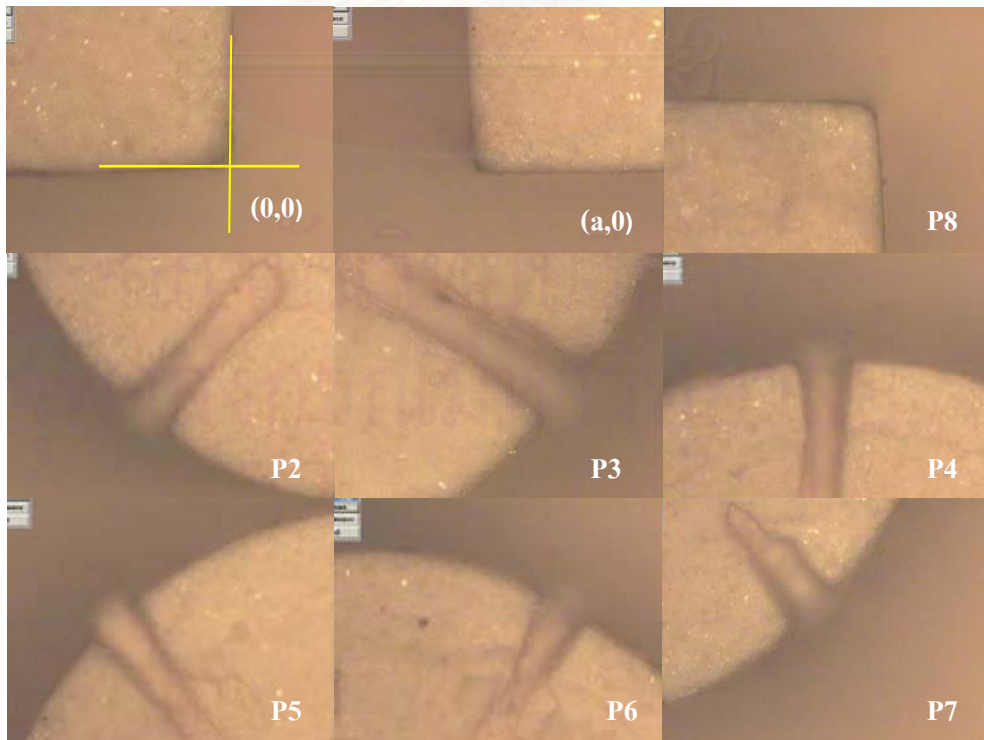
6.1 การวัดผลในระนาบ xy จะเห็นเป็นมุมมองดังรูป



รูปที่ 30 แสดงพิกัดในระนาบ xy

กระบวนการวัดจะเริ่มจากการวางชิ้นงานลงในกล้องเลื่อนให้จุด 0 ตรงกับกากบาทที่เลนส์ จากนั้นกดปุ่ม reset เพื่อให้เริ่มต้นที่พิกัด (0,0) และให้ทุกแบบจำลองมีแกน X ขนานกัน ซึ่งตรวจสอบได้จากจุดที่ 1 ต้องมีพิกัด (a,0) โดยค่า a หมายถึงระยะตามแกน X แต่ละแบบจำลองอาจไม่เท่ากัน เนื่องจากการขยายตัวของปูน และหดตัวของวัสดุพิมพ์ ส่วนค่า 0 หมายถึงไม่มีการขยับในแนวแกน Y แสดงว่าทุกแบบจำลองนั้นขนานกัน เหตุผลที่ทำเช่นนี้เพราะจะทำให้แต่ละแบบจำลองมีระนาบอ้างอิงที่ขนาน และอยู่ในแนวเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำพิกัด (x,y) ที่วัดได้จากแต่ละแบบจำลองมาเปรียบเทียบกันได้ในแง่ต่างๆ อันได้แก่ ทิศทางการกระจายตัว และระยะทางที่มีการเบี่ยงเบนไป

เมื่อใช้กำลังขยายจากกล้องจะเห็นแต่ละจุดอ้างอิงโดยจะปรับให้ตรงกับรอยกากบาทที่เลนส์กล้องดังรูป



รูปที่ 31 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope

เนื่องจากเมื่อนำแบบจำลองไปส่องผ่านกล้องกำลังขยาย 50 เท่า ทำให้จุดอ้างอิงที่ทำได้เห็นเป็นลักษณะโค้ง กระบวนการวัดจึงจะทำการขยับให้เส้นกาะบาทในเลนส์แนบกับผิวแบบจำลอง แล้วอ่านค่าจากจุดตัดของเส้นกาะบาทดังรูป

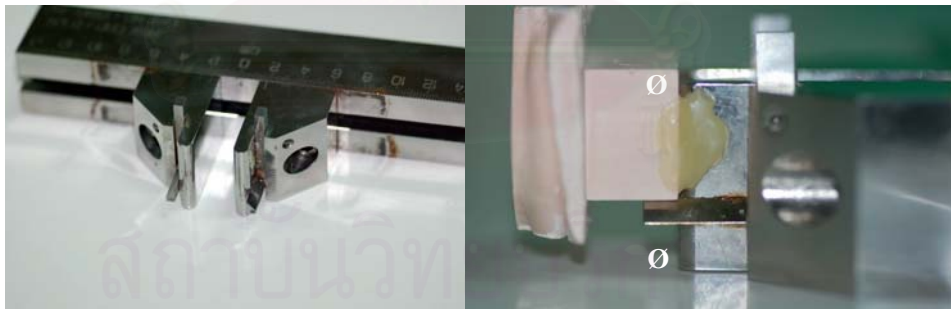


☆ = ตำแหน่งที่ใช้อ่านค่าจากกล้อง

6.2 การหาค่า z เพื่อนำมารวมให้เป็นพิกัด (x,y,z)

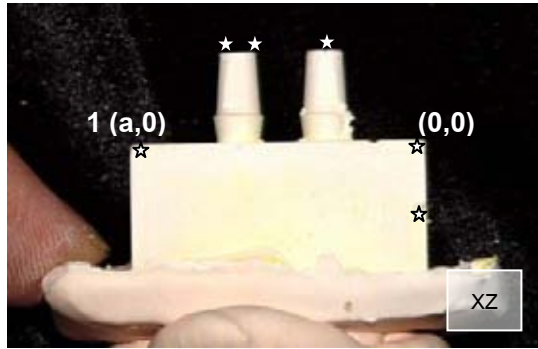
ระนาบ xz

เนื่องจากค่า z นั้นคือความสูงของรอยบากบนป่าของตัวหลัก เมื่อวัดในแนวตั้งฉากจากระนาบอ้างอิงไปยังรอยเหล่านี้ ดังนั้นจึงต้องตะแคงแบบจำลองให้ระนาบอ้างอิงตั้งฉากกับพื้นหรือขนานกับแนวการมองของกล้อง ดังรูป



รูปที่ 32 เครื่องมือที่ใช้ในการวางแบบจะลองตะแคง

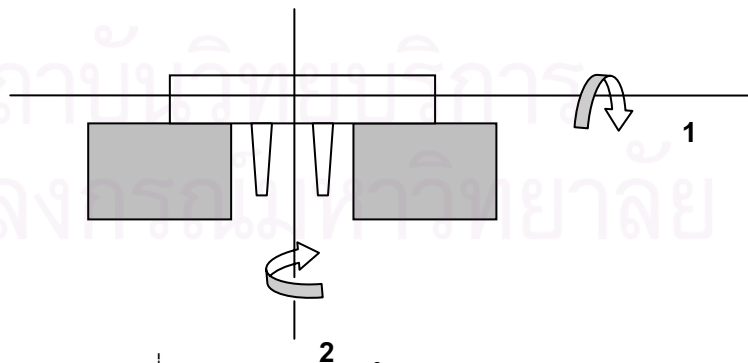
เครื่องมือที่ใช้เป็นฐานของแบบจำลอง ประยุกต์มาจาก ฐานวางชิ้นงานของเครื่องทดสอบแรงดึงและแรงอัดระบบไฮดรอลิก (Instron, England) ตรวจสอบความตั้งฉากโดยการโฟกัสที่ขอบบนและขอบล่าง \emptyset เมื่อมองผ่านกล้องต้องมีพิกัดเดียวกัน จากนั้นนำแบบจำลองมาตะแคงติดด้วยซีเมนต์เหนียว ซึ่งการวัดจะวัดทั้ง 2 ด้านของแบบจำลองเพื่อให้ได้ค่าความสูงในทุกๆจุดที่ทำเครื่องหมายไว้



รูปที่ 33 แสดงพิกัดในระนาบ xz

กระบวนการวัดจะเริ่มจากการวางชิ้นงานลงในกล่องเลื่อนให้จุด 0 ตรงกับกาทะบาทที่เลนส์ จากนั้นกดปุ่ม reset เพื่อให้เริ่มต้นที่พิกัด (0,0) และให้ทุกแบบจำลองมีแกน X ขนานกัน ซึ่งตรวจสอบได้จากจุดที่ 1 ต้องมีพิกัด (a,0) โดยค่า a หมายถึงระยะตามแกน X แต่ละแบบจำลองอาจไม่เท่ากัน เนื่องจากการขยายตัวของปูน และหดตัวของวัสดุพิมพ์ หรือจากมุมมองที่ไม่ขนานกับแนวแกนนี้ ส่วนค่า 0 หมายถึงไม่มีการขยับในแนวแกน Z แสดงว่าทุกแบบจำลองนั้นขนานกัน เหตุผลที่ทำไมเช่นนี้เพราะจะทำให้แต่ละแบบจำลองมีระนาบอ้างอิงที่ขนาน และอยู่ในแนวเดียวกันเพื่อที่จะสามารถนำพิกัด (x,z) ที่วัดได้จากแต่ละแบบจำลองมาเปรียบเทียบกันได้ในแต่ละตัว อันได้แก่ ทิศทางการกระจายตัว และระยะทางที่มีการเบี่ยงเบนไป

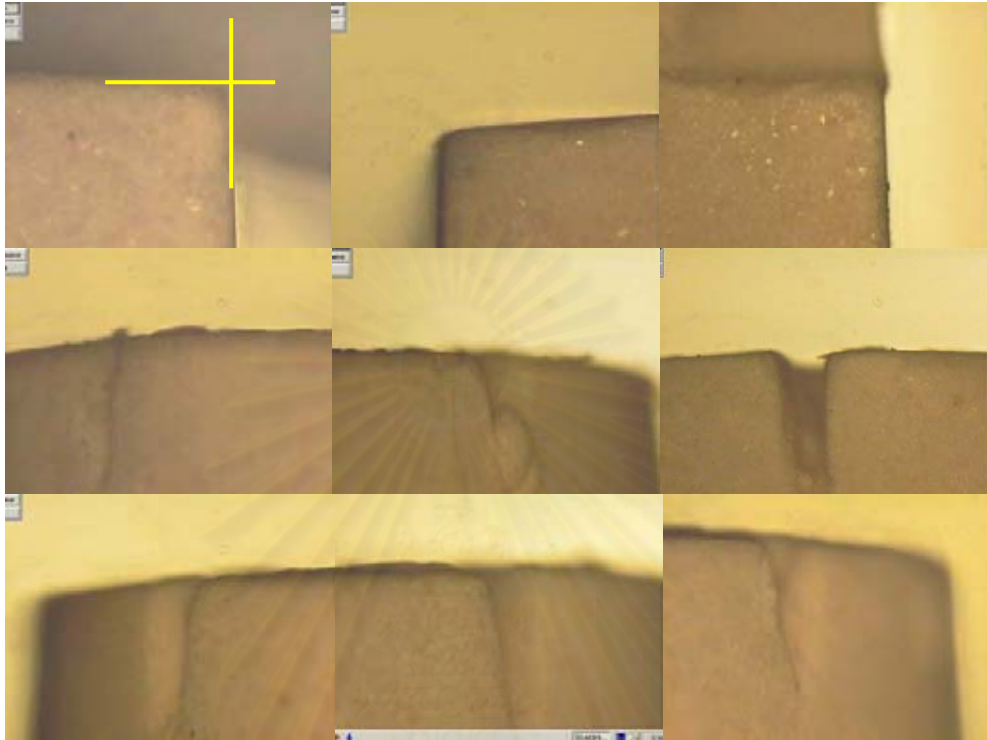
เนื่องจากฐานมุมมองที่ใช้วางแบบจำลองจะควบคุมให้มุมมองตั้งฉากกับแกน z เพราะแบบจำลองจะไม่คว่ำหน้าลงแต่จะตะแคงในแนวแกน x ได้ซึ่งจะมีผลกับพิกัด x ดังนั้นค่า x จากมุมมองนี้จึงไม่นำมาใช้ แต่ค่า z สามารถนำมาใช้ได้ เพราะไม่มีความคลาดเคลื่อนจากมุมมองเข้ามาเกี่ยวข้องและเป็นจุดๆเดียวกับที่วัด พิกัด (x,y) ดังรูป



รูปที่ 34 แสดงการหมุนในแต่ละแกน

จากรูปจะเห็นได้ว่าแกน 1 ไม่สามารถหมุนได้เพราะโดยแท่งโลหะค้ำไว้อยู่ แต่แกน 2 หมุนได้เพราะไม่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งแกน 1 จะมีผลกับค่า z แต่แกน 2 มีผลกับค่า x ดังนั้นเมื่อ แกน 2 ขยับได้ ค่า x จากมุมมองนี้จึงนำไปใช้ไม่ได้ แต่แกน 2 ไม่เกิดการหมุน ค่า z จึงนำมาใช้

เมื่อใช้กำลังขยายจากกล้องจะเห็นแต่ละจุดอ้างอิงโดยจะปรับให้ตรงกับรอยกากบาทที่เลนส์กล้องดังรูป



รูปที่ 35 แสดงภาพจากกล้อง measurement microscope

จากการวัดจะแสดงผลในแกน x, y และ z จะได้ข้อมูลออกมาครบทั้ง 3 แกนซึ่งจะเขียนเป็น พิกัด (x,y,z)

6.3 หาระยะที่แบบจำลองคลาดเคลื่อนไปจากแม่แบบโดยรวมทุกพิกัดออกมาเป็นระยะทางจริงๆที่เคลื่อนไป

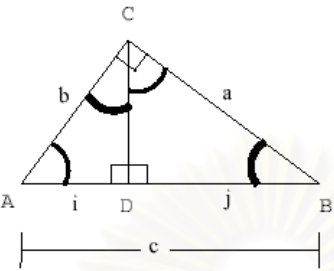
การวัดทั้งหมดจะได้พิกัด (x,y,z) อยู่บนแกนอ้างอิงเดียวกัน โดยวัดที่ยอดของตัวหลักวางเทียบทั้ง 3 จุด นำค่าที่ได้มาสร้างเป็นกราฟพิกัดเพื่อแสดงผลของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากกระบวนการพิมพ์ปากว่าเกิดในทิศทางอย่างไร จากนั้นจะทำการคำนวณสถิติว่าแบบจำลองที่ได้จากแต่ละวิธีพิมพ์นั้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่โดยระยะที่จะใช้ในการคำนวณคือระยะที่เบี่ยงเบนไปจากแม่แบบซึ่งแยกคิดทีละจุดทั้งหมด 6 จุด (ตัวหลักแต่ละตัวจะมี 3 จุดที่ขอบนอกด้านบน) แต่เนื่องจากแต่ละจุดจะมี 3 ระยะทางในแนวแกน x,y,z จึงจะทำการรวมให้เหลือเป็น 1 ค่าคือระยะห่างระหว่างแม่แบบและแบบจำลองจริงๆโดยไม่มีทิศทางเข้ามาเกี่ยวข้อง

ก่อนที่จะไปถึงสูตรที่จะนำมาใช้ในวิจัยครั้งนี้ จะกล่าวถึงทฤษฎีที่จะต้องนำมาใช้ก่อนดังนี้

ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

ความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉากของรูปสามเหลี่ยม = รากที่สองของผลบวกของกำลังสองของด้านประกอบมุมฉาก (Carr และ Stewart, 1993; Zervas และคณะ, 1999)

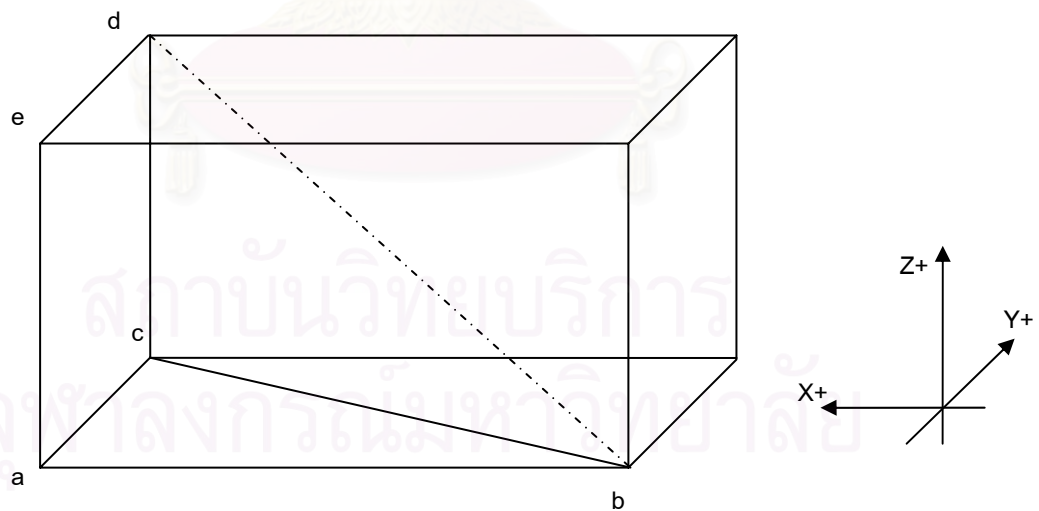
พิสูจน์ดังนี้



จากรูป จะเห็นมุม $\hat{C}AD = \hat{B}CD$ และ $\hat{A}CD = \hat{D}BC$
 จะเห็นว่าสามเหลี่ยมมุมฉากทั้งหมด 3 รูป คือ ADC , DBC , ABC
 ซึ่งมีมุมภายในทั้งสามมุม มุมต่อมุมเท่ากันหมด แสดงว่า สามเหลี่ยมมุมฉากทั้งสามรูปดังกล่าว เป็น
 สามเหลี่ยมที่คล้ายกัน โดยสมบัติของสามเหลี่ยมที่คล้ายกัน

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม ADC กับ สามเหลี่ยม ABC จะได้ว่า $\frac{b}{i} = \frac{c}{b}$ หรือ $b^2 = ci$
 เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยม DBC กับ สามเหลี่ยม ABC จะได้ว่า $\frac{a}{j} = \frac{c}{a}$ หรือ $a^2 = cj$
 $\therefore a^2 + b^2 = ci + cj = c(i + j) = (c)(c) = c^2$!!!

การหาระยะทางระหว่างจุด 2 จุดในรูป 3 มิติได้ๆจากวิธีนี้



- ab = ระยะตามแกน x
- ac = ระยะตามแกน y
- ae = ระยะตามแกน z

การหาระยะ bd ซึ่ง bd คือเส้นทแยงมุมของกล่องเป็นด้านตรงข้ามมุมฉากของสามเหลี่ยม bcd ดังนั้นการจะรู้ค่า bd ต้องรู้ระยะ cb และ cd ก่อน ซึ่งเป็นด้านประกอบมุมฉาก เริ่มต้นจาก

$$cb = \sqrt{ac^2 + ab^2} \dots\dots\dots 1$$

cb เป็นด้านตรงข้ามมุมฉากซึ่งมีด้านประกอบมุมฉากคือ ac และ ab

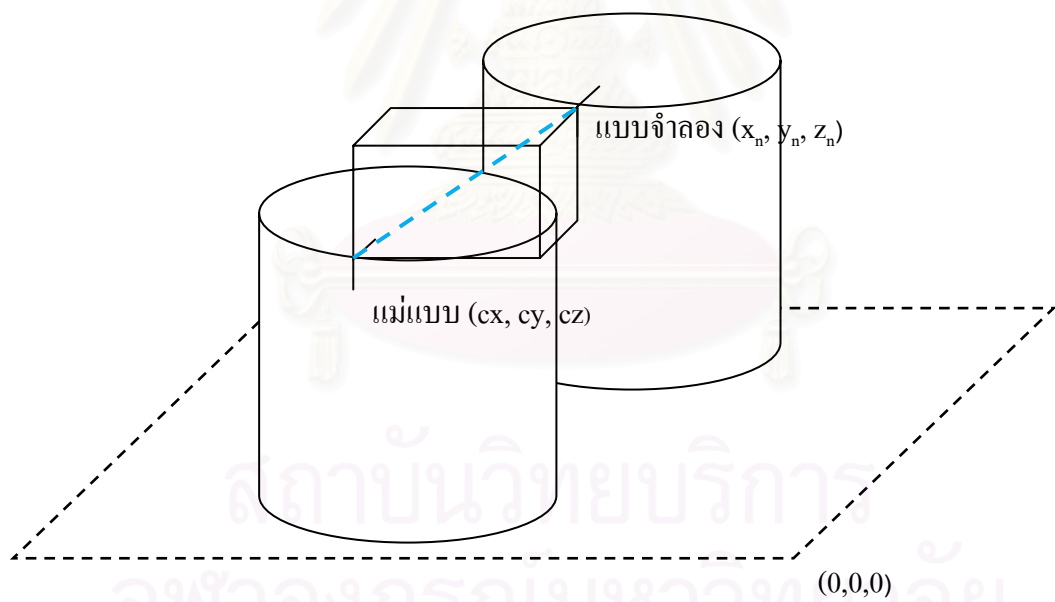
$$bd = \sqrt{cd^2 + cb^2} \qquad cd = ae \dots\dots\dots 2$$

เพราะฉะนั้นแทนค่าสมการ 1 ลงใน สมการที่ 2 จะได้

$$bd = \sqrt{ac^2 + ab^2 + ae^2}$$

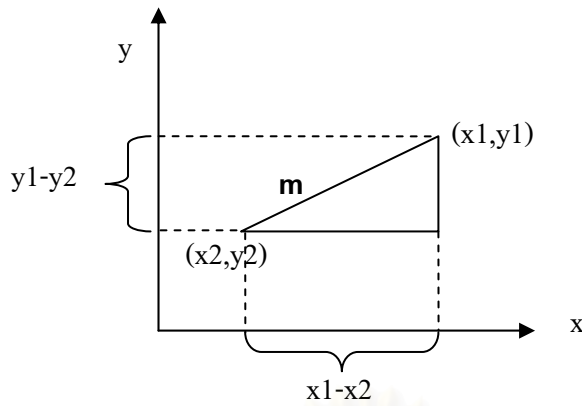
จากสูตรนี้จะนำมาประยุกต์ใช้ดังนี้

เนื่องจากทุกแบบจำลองและแม่แบบมีจุดเริ่มต้นพิกัด $(0,0,0)$ อยู่ที่มุมของฐานเหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถนำพิกัดบนบ่าของตัวหลักมาลบกันได้เพื่อดูความแตกต่างระหว่างแม่แบบและแบบจำลอง ดังรูป แสดงพิกัดบนบ่าของตัวหลักแม่แบบ และแบบจำลองเมื่อนำระยะนับอ้างอิง (เส้นประ) มาซ้อนทับกัน



รูปที่ 36 แสดงระยะที่มีการเบี่ยงเบนไป

เส้นประทแยงมุมคือระยะระหว่างพิกัดบนแม่แบบและแบบจำลองเมื่อนำระยะนับอ้างอิงมาซ้อนทับกัน ส่วนกล่องสี่เหลี่ยมคือการสมมติให้เหมือนการพิสูจน์สูตร เพราะฉะนั้นเส้นสีฟ้าก็คือเส้นทแยงมุมของกล่องนั่นเอง ซึ่งความยาวของด้านแต่ละด้านของกล่อง ก็คือความยาวตามแกน x,y,z ซึ่งความยาวแต่ละด้านหาได้จากการลบกันของพิกัด เพื่อให้ง่ายในการเข้าใจจะสมมติเป็นภาพ 2 มิติ ในแกน x,y ดังรูป



รูปที่ 37 แสดงจุดพิกัด 2 มิติ

ความยาวตามแกน x มีค่า $x_1 - x_2$ ซึ่ง x_1 และ x_2 คือ พิกัด x ของแต่ละจุด

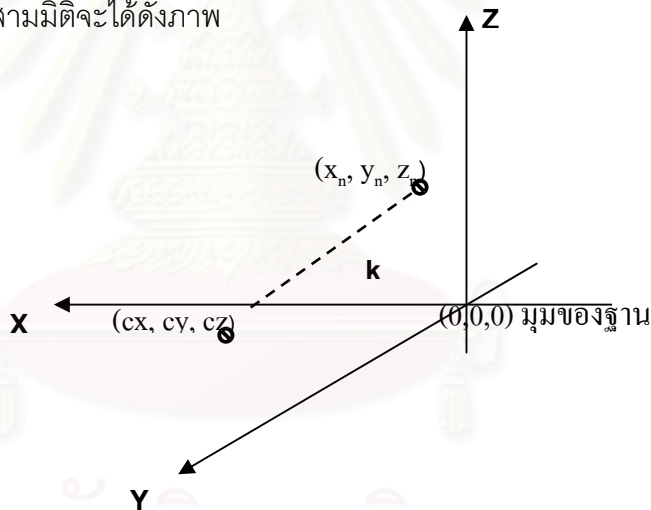
ความยาวตามแกน y มีค่า $y_1 - y_2$ ซึ่ง y_1 และ y_2 คือ พิกัด y ของแต่ละจุด

m เป็นด้านตรงข้ามมุมฉาก ซึ่งความยาวของด้านนี้ จะมีค่าเท่ากับ รากที่สองของผลบวก

ของกำลังสองของด้านประกอบมุมฉาก ดังสูตร

$$m = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

ดังนั้นเมื่อมองเป็นสามมิติจะได้ดังภาพ



รูปที่ 38 แสดงจุดพิกัด 3 มิติ

k = ระยะระหว่างจุดบนแม่แบบ กับจุดบนแบบจำลอง

$$= \sqrt{(x_n - cx)^2 + (y_n - cy)^2 + (z_n - cz)^2}$$

cx, cy, cz = พิกัดจุดบนแม่แบบ

x_n, y_n, z_n = พิกัดจุดบนแบบจำลองแต่ละอัน

n = ชั้นงานที่ 1 - 10

$x_n - cx$ = ความยาวด้านตามแกน x

$y_n - cy$ = ความยาวด้านตามแกน y

$z_n - cz$ = ความยาวด้านตามแกน z

เนื่องจากจะทำการเปรียบเทียบจุดขอบนอกด้านบนของตัวหลักกรากเทียมระหว่างแม่แบบ และแบบจำลองโดยนำแต่ละแบบจำลองมาเทียบกับแม่แบบ เราจึงกำหนดให้แม่แบบเป็น จุดอ้างอิงเริ่มต้นในการเปรียบเทียบ (cx, cy, cz) และนำจุดเดียวกันนั้นบนแบบจำลองมา เปรียบเทียบ (x_n, y_n, z_n) ที่ละตำแหน่งที่ขอบนอกด้านบนของตัวหลักกรากเทียม รวมทั้งหมด 6 จุด

ระนาบอ้างอิง หมายถึงระนาบหน้าตัดของฐานสี่เหลี่ยม (เส้นสีแดง) ดังแสดงในรูป ซึ่ง กำหนดให้ทุกๆแบบจำลองและแม่แบบจะมีพิกัดที่ขนานกันและมีจุด (0,0,0) อยู่ตำแหน่งเดียวกัน เพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกันได้

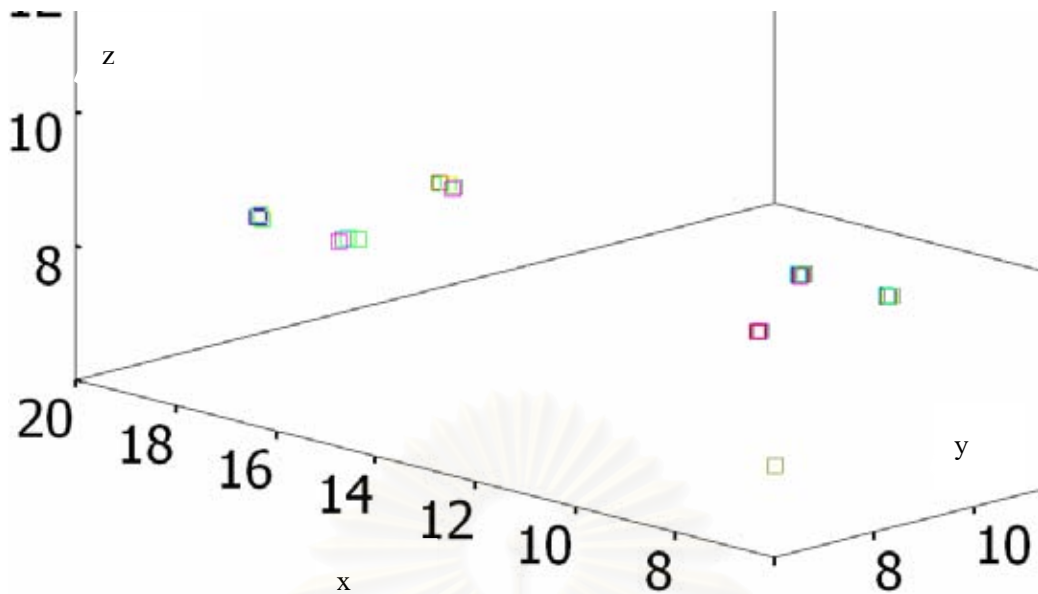
การวัดทั้งหมดทุกพิกัดจะวัดไปทางแกน +x,+y,+z ดังนั้นค่าพิกัดทั้งหมดจึงมีแต่ค่าบวก ส่วนความคลาดเคลื่อนทิศทางขึ้นหรือลง ซ้ายหรือขวา จะแสดงจกตัวเลขที่อ่านได้ เช่น ใน แนวแกน Z ขึ้นแม่แบบวัดได้ 15 มิลลิเมตร แบบจำลองวัดได้ 13 มิลลิเมตร แสดงว่าแบบจำลองที่ ได้เตี้ยลง 2 มิลลิเมตร แต่ถ้าหากแบบจำลองวัดได้ 18 มิลลิเมตร แสดงว่าแบบจำลองที่ได้สูงขึ้น 3 มิลลิเมตร

6.4 วิเคราะห์ข้อมูล

6.4.1 สร้างกราฟจากพิกัด (x,y,z) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของข้อมูล

เนื่องจากวิจัยนี้จะทำการวัดในลักษณะ 3 มิติ ดังนั้นเมื่อมองไปในรายละเอียด ของแต่ละจุดจะประกอบด้วยค่า 3 ค่าได้แก่ (x,y,z) ซึ่งแต่ละค่านี้จะบอกว่าจุดนั้นอยู่ห่าง จากจุด (0,0,0) ไปเป็นระยะทางเท่าไรตามแต่ละแนวแกน ดังนั้นทุกแบบจำลองจะมี จุดอ้างอิง (0,0,0) เหมือนกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบกันได้ ดังนั้นจึงสามารถนำพิกัดของ แต่ละแบบจำลองมาสร้างเป็นกราฟ 3 มิติที่มีจุดเริ่มต้นเดียวกันได้เพื่อและลักษณะการ กระจายของข้อมูล โดยจะแยกพิจารณาเป็นแต่ละกลุ่มทดลองไป ดังรูป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

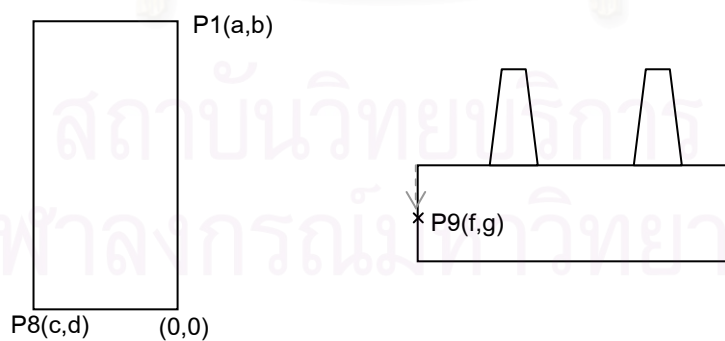


รูปที่ 39 กราฟแสดงจุดพิกัดทุกจุดบนตัวหลัก

6.4.2 หานัยสำคัญของความคลาดเคลื่อนจากแต่ละวิธีการพิมพ์ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยใช้สถิติ One-way ANOVA

6.5 การวัดการขยายตัวของปูนและการหดตัวของวัสดุพิมพ์

ระยะที่เบี่ยงเบนไป เป็นผลมาจากกระบวนการพิมพ์ปากซึ่งรวมถึงผลจากการหดตัวของวัสดุพิมพ์ปาก และการขยายตัวของปูน ซึ่งผลรวมของการหดตัวของวัสดุพิมพ์และขยายตัวของปูนนี้สามารถหาได้จากจุดอ้างอิงที่เหลือ (พิกัด 0,p1,p8,p9) ในระนาบ x, y และในแนวแกน z



รูปที่ 40 แสดงจุดที่ใช้วัดปูนขยายตัว

$$\text{ผลรวมการหดขยายในแนวแกน } x = a_2 - a_1$$

$$\text{ผลรวมการหดขยายในแนวแกน } y = d_2 - d_1$$

$$\text{ผลรวมการหดขยายในแนวแกน } z = g_2 - g_1$$

a_2, d_2, g_2 = ระยะในแนวแกน x, y, z ของแบบจำลอง

a_1, d_1, g_1 = ระยะในแนวแกน x, y, z ของแม่แบบ

ผลรวมการหดขยายคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในแต่ละแกน

$$\%x = 100(a_2 - a_1)/a_1$$

$$\%y = 100(d_2 - d_1)/d_1$$

$$\%z = 100(g_2 - g_1)/g_1$$

การวิเคราะห์ข้อมูล

วัดความสัมพันธ์ระหว่างแม่แบบรากเทียมกับแบบจำลองรากเทียม โดยทำการเปรียบเทียบว่าวิธีพิมพ์ปากแต่ละวิธีมีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลองรากเทียมแตกต่างกันหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมเอสพีเอสเอส รุ่น 11.5 (SPSS version 11.5) วิเคราะห์ด้วยสถิติ โคลโมโกรอฟ - สเมอนอฟ (Kolmogorov-Smirnov) ซึ่งเป็นสถิติที่ใช้วิเคราะห์การกระจายของข้อมูล และวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน โดยใช้สถิติลีวินส์เทสต์ (Levene's test) จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว One-way ANOVA ชนิด Welch test และ Tamhane's เพื่อหาว่าวิธีใดบ้างที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

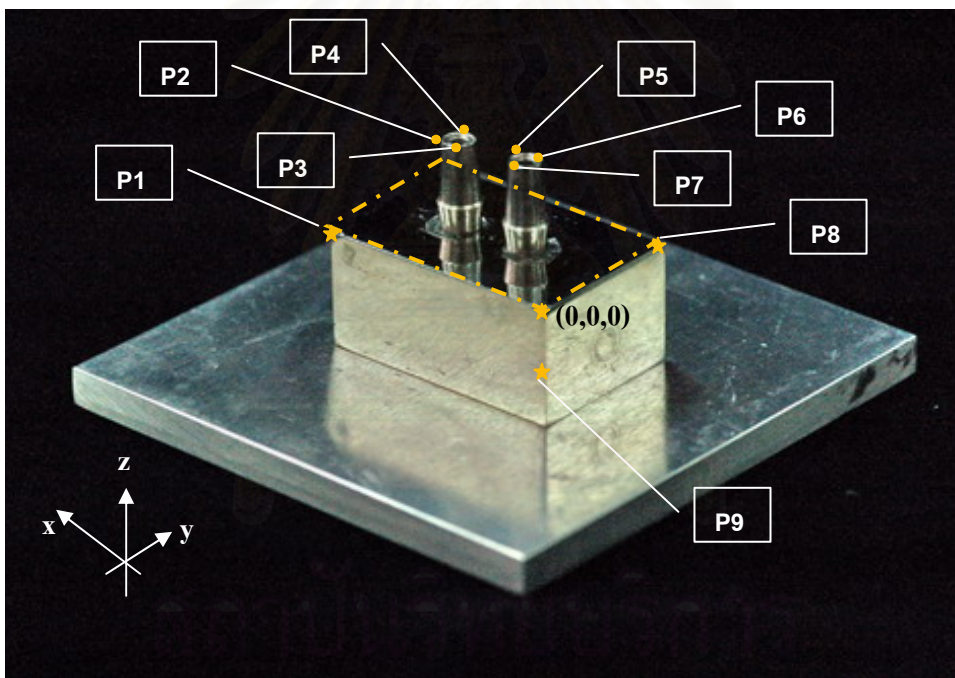
การคำนวณนั้นจะแยกคำนวณทางสถิติแต่ละจุดทั้งหมด 6 จุด ได้แก่ p2-p7 ซึ่ง กลุ่มตัวอย่างนั้นมีทั้งหมด 3 กลุ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่เกิดจากวิธีการพิมพ์ 3 วิธี ได้แก่ วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปอดมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดและทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์ โดยจะทำการวัดข้อมูลเป็นจุดพิกัด (x,y,z) แต่ละตัวหลักจะบารออยู่ที่ขอบนอกด้านบนสุด 3 จุด เพื่อแทนระนาบหน้าตัดของตัวหลัก และมีจุดอ้างอิงที่แต่ละมุมของฐานสี่เหลี่ยมเพื่อให้เปรียบเทียบแต่ละแบบจำลอง หน่วยที่ใช้วัดเป็นมิลลิเมตร และมีทศนิยม 3 ตำแหน่ง ดังรูป



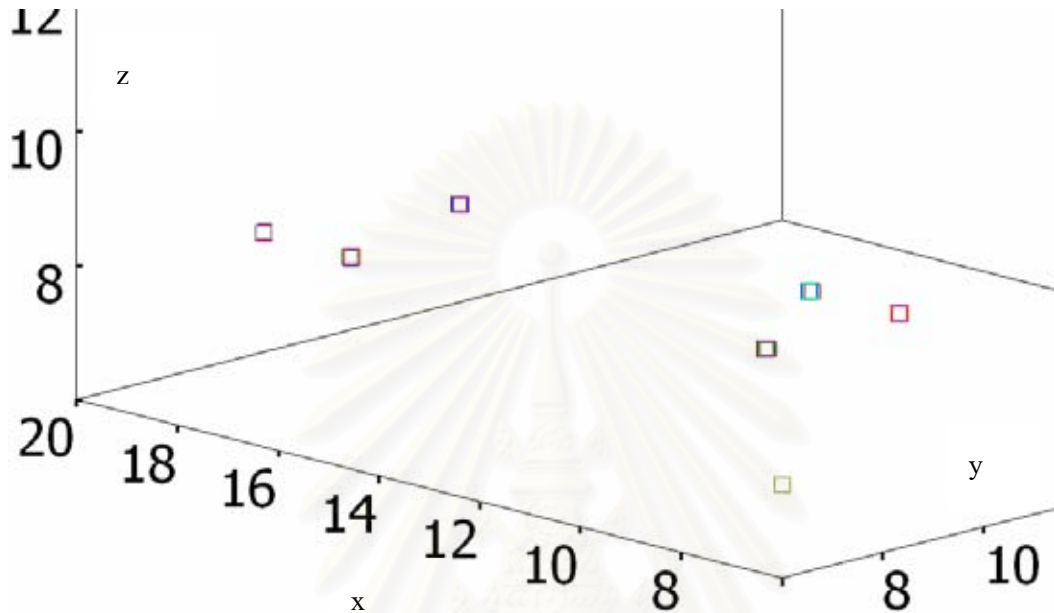
รูปที่ 41 แสดงพิกัดต่างๆ บนแบบจำลอง

การวัดผลดังที่กล่าวไปในบทที่ 3 แล้วนั้นจะทำการวัดข้อมูล 2 แบบ ได้แก่ กราฟที่แสดงถึงลักษณะทิศทางการกระจายของข้อมูลในแต่ละกลุ่มทดลอง ส่วนข้อมูลอีกแบบคือระยะทางความแตกต่างระหว่างแม่แบบ กับแบบจำลองที่ได้จาก 3 วิธีการพิมพ์ แต่ละตัวหลักจะมีเครื่องหมายอยู่บนบ่า 3 จุด แต่เนื่องจากมีตัวหลัก 2 ตัว จึงจะมีข้อมูลทั้งหมด 6 ชุด ซึ่งจะแยกพิจารณาทีละจุดไป โดยข้อมูลในส่วนนี้จะนำไปคำนวณสถิติเพื่อหาค่าความสำคัญของความแตกต่างระหว่างแต่ละวิธีการพิมพ์

ผลการวิเคราะห์

1. กราฟทิศทางการกระจายของข้อมูล

กลุ่มที่ 1 วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ



รูปที่ 42 กราฟแสดงจุดพิกัดของกลุ่มที่ 1

จากตารางที่ 1-3 จะแสดงถึงค่าของข้อมูลแต่ละแบบจำลอง

ตารางที่ 1 แสดงถึงพิกัด x ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

xcon	xg1	xg2	xg3	xg4	xg5	xg6	xg7	xg8	xg9	xg10	mean	sd	
17.758	17.759	17.768	17.774	17.748	17.761	17.757	17.756	17.763	17.760	17.762	17.761	0.007	p2
15.881	15.866	15.894	15.889	15.881	15.895	15.885	15.881	15.891	15.887	15.895	15.886	0.009	p3
16.760	16.749	16.769	16.772	16.741	16.758	16.766	16.760	16.750	16.775	16.777	16.762	0.012	p4
9.818	9.801	9.836	9.840	9.821	9.821	9.816	9.822	9.827	9.823	9.824	9.823	0.011	p5
8.107	8.097	8.097	8.115	8.091	8.096	8.110	8.114	8.097	8.114	8.118	8.105	0.010	p6
7.986	7.960	7.970	8.000	7.961	8.000	7.976	7.999	8.000	7.997	7.993	7.986	0.017	p7

ตารางที่ 2 แสดงถึงพิกัด y ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด เช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

ycon	yg1	yg2	yg3	yg4	yg5	yg6	yg7	yg8	yg9	yg10	mean	
7.487	7.501	7.499	7.498	7.496	7.495	7.498	7.497	7.491	7.491	7.490	7.496	p2
7.328	7.335	7.337	7.333	7.336	7.346	7.339	7.340	7.340	7.337	7.321	7.336	p3
10.362	10.381	10.381	10.370	10.366	10.376	10.380	10.376	10.370	10.371	10.354	10.373	p4
10.388	10.402	10.385	10.374	10.397	10.376	10.398	10.390	10.378	10.393	10.372	10.386	p5
10.420	10.442	10.421	10.437	10.425	10.432	10.411	10.433	10.426	10.438	10.417	10.428	p6
7.676	7.689	7.688	7.668	7.685	7.663	7.684	7.664	7.663	7.663	7.672	7.674	p7

ตารางที่ 3 แสดงถึงพิกัด z ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด เช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

zcon	zg1	zg2	zg3	zg4	zg5	zg6	zg7	zg8	zg9	zg10	mean	
8.604	8.618	8.614	8.614	8.611	8.621	8.611	8.637	8.612	8.614	8.611	8.616	p2
8.638	8.646	8.649	8.640	8.648	8.645	8.644	8.675	8.641	8.654	8.646	8.649	p3
8.678	8.690	8.674	8.682	8.682	8.683	8.687	8.695	8.691	8.687	8.691	8.686	p4
8.682	8.698	8.684	8.699	8.706	8.699	8.699	8.709	8.704	8.699	8.697	8.699	p5
8.673	8.682	8.673	8.690	8.682	8.686	8.681	8.701	8.688	8.684	8.684	8.685	p6
8.697	8.699	8.701	8.710	8.706	8.696	8.695	8.689	8.694	8.695	8.710	8.700	p7

xcon หมายถึงพิกัด x บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ycon หมายถึงพิกัด y บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

zcon หมายถึงพิกัด z บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

xgn หมายถึงพิกัด x บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ygn หมายถึงพิกัด y บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

zgn หมายถึงพิกัด z บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

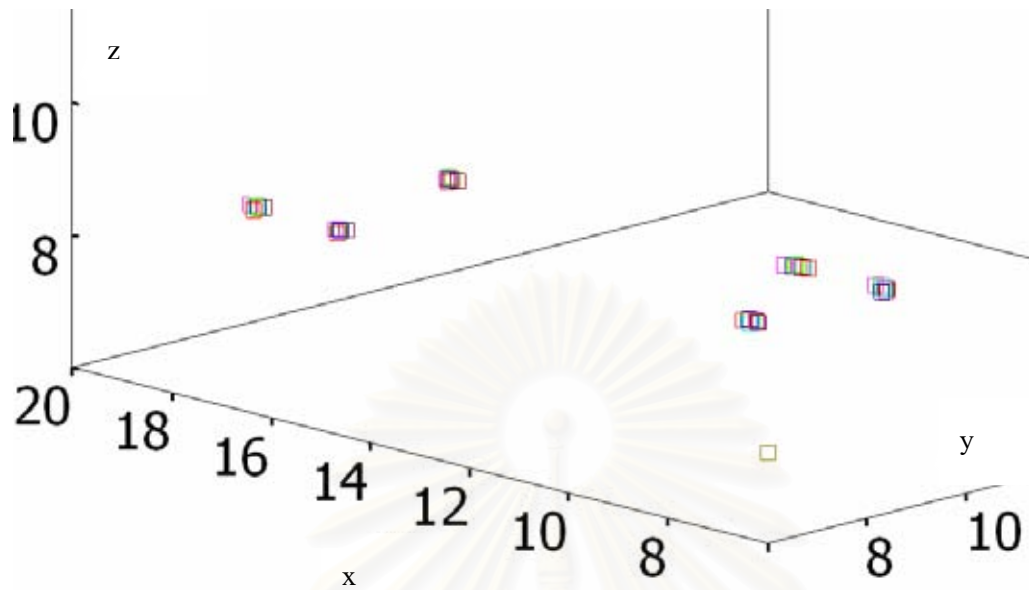
n หมายถึง ชั้นแบบจำลองมีค่า 1-10

แกน x จุด p7 มีการกระจายสูงสุด 40 ไมโครเมตร

แกน y จุด p5 มีการกระจายสูงสุด 30 ไมโครเมตร

แกน z จุด p3 มีการกระจายสูงสุด 35 ไมโครเมตร

กลุ่มที่ 2 วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด้ว้



รูปที่ 43 กราฟแสดงจุดพิกัดของลุ่มที่ 2

จากตารางที่ 4-6 จะแสดงถึงค่าของข้อมูลแต่ละแบบจำลอง

ตารางที่ 4 แสดงถึงพิกัด x ของทุกจุดบนแบบจำลองลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด้ว้

xcon	xdi1	xdi2	xdi3	xdi4	xdi5	xdi6	xdi7	xdi8	xdi9	xdi10	mean	
17.758	17.780	17.783	17.771	17.913	17.790	17.808	17.839	17.763	17.716	17.783	17.795	p2
15.881	15.901	15.957	15.901	15.956	15.926	15.941	15.990	15.902	15.856	15.957	15.929	p3
16.760	16.754	16.813	16.774	16.792	16.808	16.792	16.817	16.731	16.679	16.813	16.777	p4
9.818	9.646	9.847	9.858	9.966	9.782	9.841	9.890	9.790	9.761	9.847	9.823	p5
8.107	7.939	8.137	7.968	8.270	8.074	8.140	8.174	8.080	8.050	8.137	8.097	p6
7.986	8.079	8.013	8.038	7.960	8.035	8.041	8.077	7.940	7.923	8.013	8.012	p7

ตารางที่ 5 แสดงถึงพิกัด y ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอด ถ่ายทอดรวมด้วย

ycon	ydi1	ydi2	ydi3	ydi4	ydi5	ydi6	ydi7	ydi8	ydi9	ydi10	mean	
7.487	7.436	7.478	7.509	7.504	7.562	7.547	7.542	7.522	7.572	7.478	7.515	p2
7.328	7.253	7.319	7.295	7.260	7.337	7.347	7.353	7.319	7.380	7.319	7.318	p3
10.362	10.307	10.367	10.373	10.341	10.406	10.409	10.417	10.389	10.438	10.367	10.381	p4
10.388	10.470	10.403	10.384	10.308	10.510	10.420	10.451	10.423	10.451	10.403	10.422	p5
10.420	10.342	10.440	10.273	10.455	10.425	10.437	10.462	10.460	10.477	10.440	10.421	p6
7.676	7.606	7.704	7.681	7.733	7.691	7.706	7.731	7.734	7.741	7.704	7.703	p7

ตารางที่ 6 แสดงถึงพิกัด z ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอด ถ่ายทอดรวมด้วย

zcon	zdi1	zdi2	zdi3	zdi4	zdi5	zdi6	zdi7	zdi8	zdi9	zdi10	mean	
8.604	8.530	8.578	8.564	8.576	8.547	8.566	8.576	8.548	8.554	8.578	8.562	p2
8.638	8.571	8.606	8.602	8.614	8.581	8.591	8.594	8.584	8.596	8.606	8.594	p3
8.678	8.596	8.639	8.622	8.631	8.625	8.629	8.644	8.637	8.607	8.639	8.627	p4
8.682	8.620	8.633	8.621	8.626	8.600	8.627	8.640	8.622	8.607	8.633	8.623	p5
8.673	8.619	8.620	8.610	8.614	8.620	8.618	8.646	8.623	8.610	8.620	8.620	p6
8.697	8.661	8.666	8.673	8.662	8.612	8.651	8.652	8.653	8.643	8.666	8.654	p7

xcon หมายถึงพิกัด x บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ycon หมายถึงพิกัด y บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

zcon หมายถึงพิกัด z บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

xdi หมายถึงพิกัด x บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ydi หมายถึงพิกัด y บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

zdi หมายถึงพิกัด z บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

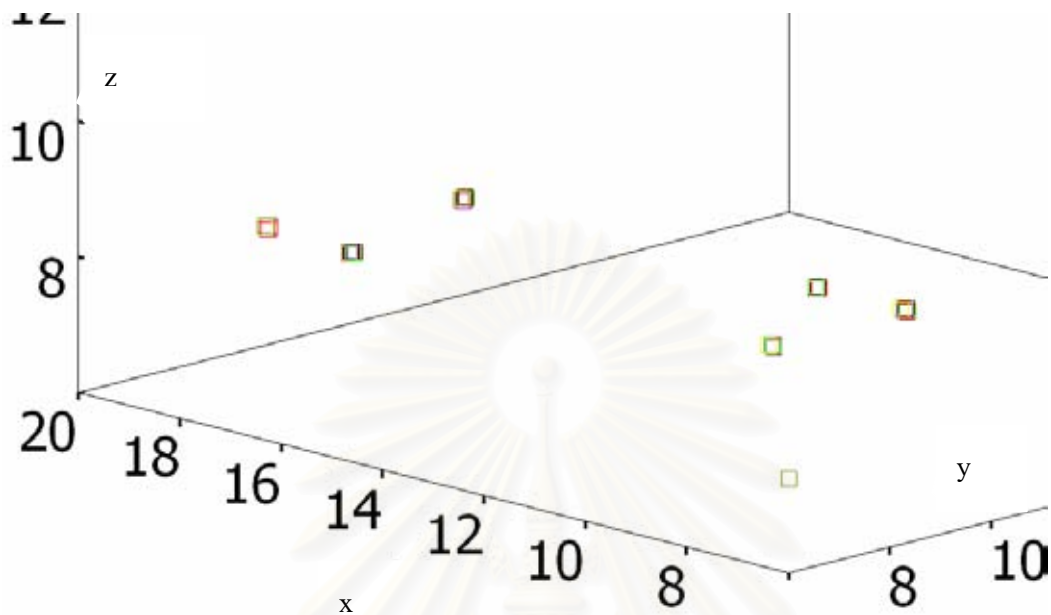
แกน x จุด p6 มีการกระจายสูงสุด 195 ไมโครเมตร

แกน y จุด p6 มีการกระจายสูงสุด 204 ไมโครเมตร

แกน z จุด p7 มีการกระจายสูงสุด 30 ไมโครเมตร

กลุ่มที่ 3 วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย และทำการเชื่อมติดกับถาด

พิมพ์



รูปที่ 44 กราฟแสดงจุดพิกัดของกลุ่มที่ 3

จากตารางที่ 7-9 จะแสดงถึงค่าของข้อมูลแต่ละแบบจำลอง

ตารางที่ 7 แสดงถึงพิกัด x ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย และทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์

xcon	xdis1	xdis2	xdis3	xdis4	xdis5	xdis6	xdis7	xdis8	xdis9	xdis10	mean	
17.758	17.763	17.769	17.819	17.805	17.812	17.780	17.800	17.793	17.773	17.813	17.793	p2
15.881	15.906	15.911	15.922	15.971	15.941	15.937	15.946	15.948	15.946	15.973	15.940	p3
16.760	16.788	16.783	16.809	16.788	16.807	16.760	16.792	16.804	16.752	16.787	16.787	p4
9.818	9.820	9.828	9.849	9.851	9.840	9.829	9.848	9.870	9.834	9.857	9.843	p5
8.107	8.103	8.111	8.154	8.146	8.134	8.141	8.141	8.126	8.125	8.149	8.133	p6
7.986	8.007	7.991	8.014	8.014	8.043	8.014	8.017	8.040	8.007	8.027	8.017	p7

ตารางที่ 8 แสดงถึงพิกัด y ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอด ถ่ายทอดพร้อมด้วย และทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์

ycon	ydis1	ydis2	ydis3	ydis4	ydis5	ydis6	ydis7	ydis8	ydis9	ydis10	mean	
7.487	7.521	7.521	7.502	7.514	7.527	7.452	7.519	7.487	7.527	7.525	7.510	p2
7.328	7.284	7.355	7.313	7.306	7.333	7.258	7.361	7.292	7.323	7.313	7.314	p3
10.362	10.350	10.424	10.369	10.375	10.393	10.319	10.391	10.349	10.387	10.386	10.374	p4
10.388	10.390	10.437	10.403	10.424	10.402	10.347	10.401	10.405	10.425	10.453	10.409	p5
10.420	10.406	10.460	10.431	10.452	10.442	10.365	10.429	10.433	10.449	10.472	10.434	p6
7.676	7.661	7.711	7.707	7.721	7.707	7.627	7.700	7.703	7.722	7.712	7.697	p7

ตารางที่ 9 แสดงถึงพิกัด z ของทุกจุดบนแบบจำลองกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอด ถ่ายทอดพร้อมด้วย และทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์

zcon	zdis1	zdis2	zdis3	zdis4	zdis5	zdis6	zdis7	zdis8	zdis9	zdis10	mean	
8.604	8.550	8.535	8.564	8.534	8.561	8.577	8.601	8.592	8.586	8.566	8.566	p2
8.638	8.599	8.560	8.596	8.558	8.587	8.594	8.606	8.606	8.598	8.588	8.589	p3
8.678	8.613	8.629	8.626	8.603	8.644	8.657	8.662	8.630	8.660	8.643	8.637	p4
8.682	8.633	8.631	8.629	8.616	8.639	8.637	8.663	8.623	8.648	8.639	8.636	p5
8.673	8.602	8.627	8.621	8.607	8.620	8.644	8.661	8.629	8.649	8.637	8.630	p6
8.697	8.646	8.621	8.654	8.613	8.651	8.653	8.662	8.653	8.660	8.640	8.645	p7

xcon หมายถึงพิกัด x บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ycon หมายถึงพิกัด y บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

zcon หมายถึงพิกัด z บนแม่แบบ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

xdis หมายถึงพิกัด x บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

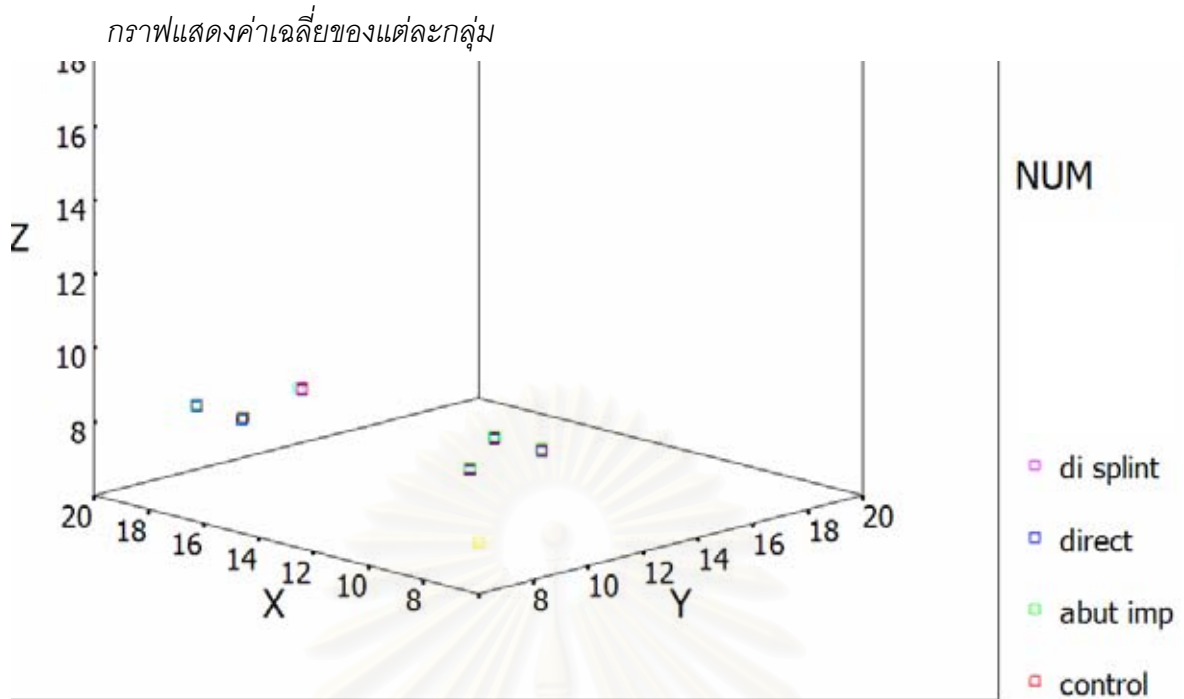
ydis หมายถึงพิกัด y บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

zdis หมายถึงพิกัด z บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

แกน x จุด p3 มีการกระจายสูงสุด 67 ไมโครเมตร

แกน y จุด p3 มีการกระจายสูงสุด 97 ไมโครเมตร

แกน z จุด p2 มีการกระจายสูงสุด 67 ไมโครเมตร

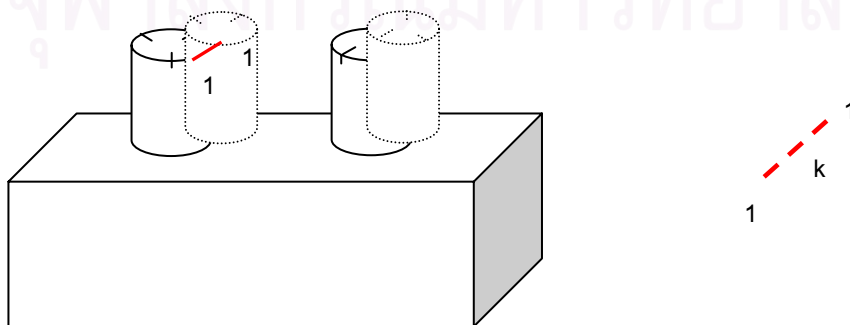


รูปที่ 45 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม

การพค่าเฉลี่ยที่ดูไม่แตกต่างกันมากเพราะความเบี่ยงเบนเกิดขึ้นในหลายทิศทางซึ่งเมื่อรวมแล้วจึงไม่แตกต่างกันมากในแต่ละวิธีพิมพ์ แต่ค่าเฉลี่ยนี้ไม่ได้นำมาวิเคราะห์สถิติ ซึ่งค่าที่นำมาใช้วิเคราะห์สถิตินั้นคือระยะทางที่เบี่ยงเบนไปที่เกิดจากระยะของแบบจำลองลบด้วยระยะของแม่แบบ แล้ววัดเป็นตัวเลขว่าเบี่ยงเบนไปเท่าไรในแต่ละแบบจำลองซึ่งไม่เกี่ยวกับทิศทาง

2. ระยะทางความแตกต่างระหว่างแม่แบบ กับแบบจำลอง และผลสถิติ

หลังจากได้พิกัด (x,y,z) ในแต่ละตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้บนแม่แบบ (p2-p9) มาแล้ว และนำมาวาดกราฟ ซึ่งกราฟแสดงถึงการเบี่ยงเบนของแบบจำลองที่เกิดจากการพิมพ์แต่ละวิธีว่าไปทางทิศใด และเป็นระยะตามแนวแกนเท่าไรจากแม่แบบแล้ว จะทำหาระยะทางรวมที่พิกัด (x,y,z) บนแบบจำลองมีการเบี่ยงเบนไปจากแม่แบบ ณ.ตำแหน่ง p2-p7 บนป่าของตัวหลักกราก เทียมทั้งสองตัวดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งจะแยกพิจารณาทีละจุดไปโดยใช้สูตร



รูปที่ 46 แสดงระยะเบี่ยงเบนระหว่างแม่แบบและแบบจำลอง

k = ระยะระหว่างจุดบนแม่แบบ กับจุดบนแบบจำลอง หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 $= \sqrt{(x_n - x_{con})^2 + (y_n - y_{con})^2 + (z_n - z_{con})^2}$
 $x_{con}, y_{con}, z_{con}$ = พิกัดจุดบนแม่แบบ (พิกัด $x_{con}, y_{con}, z_{con}$ จากตาราง 1-3)
 x_n, y_n, z_n = พิกัดจุดบนแบบจำลองแต่ละอัน (พิกัด x, y, z จากตาราง 1-9)
 n = ชิ้นงานที่ 1 - 10

ขั้นตอนการคำนวณเป็นดังนี้ ซึ่งจะยกตัวอย่างเพียงกลุ่มที่ 1 เท่านั้น

กลุ่มที่ 1 วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

ตารางที่ 10 แสดงถึงค่า $xg_n - x_{con}$ คำนวณต่อจากตาราง 1

$xg1-c$	$xg2-c$	$xg3-c$	$xg4-c$	$xg5-c$	$xg6-c$	$xg7-c$	$xg8-c$	$xg9-c$	$xg10-c$	
0.000	0.009	0.015	-0.010	0.002	-0.002	-0.002	0.005	0.002	0.003	p2
-0.015	0.013	0.008	0.000	0.015	0.004	0.000	0.010	0.006	0.014	p3
-0.011	0.010	0.012	-0.018	-0.002	0.007	0.001	-0.010	0.015	0.018	p4
-0.017	0.018	0.021	0.002	0.002	-0.002	0.003	0.008	0.004	0.005	p5
-0.010	-0.010	0.008	-0.015	-0.011	0.003	0.007	-0.009	0.007	0.011	p6
-0.025	-0.016	0.014	-0.024	0.015	-0.009	0.014	0.015	0.011	0.007	p7

c = x_{con}

xg_n = พิกัด x บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

n = ชิ้นงานที่ 1 - 10

p2-7 = ตำแหน่งอ้างอิงบนตัวหลัก

จากนั้น ยกกำลังสองทั้งตาราง ดังตาราง 11

ตารางที่ 11 แสดงถึงค่า $(xg_n - x_{con})^2$

$xg1s2$	$xg2s2$	$xg3s2$	$xg4s2$	$xg5s2$	$xg6s2$	$xg7s2$	$xg8s2$	$xg9s2$	$xg10s2$	
8E-08	8E-05	2E-04	1E-04	6E-06	4E-06	4E-06	3E-05	3E-06	1E-05	p2
2E-04	2E-04	6E-05	4E-09	2E-04	1E-05	1E-07	1E-04	4E-05	2E-04	p3
1E-04	9E-05	1E-04	3E-04	4E-06	4E-05	6E-07	9E-05	2E-04	3E-04	p4
3E-04	3E-04	4E-04	6E-06	5E-06	5E-06	1E-05	7E-05	2E-05	3E-05	p5
9E-05	1E-04	7E-05	2E-04	1E-04	1E-05	5E-05	9E-05	5E-05	1E-04	p6
6E-04	3E-04	2E-04	6E-04	2E-04	8E-05	2E-04	2E-04	1E-04	5E-05	p7

$xgns2$ = $(xg_n - x_{con})^2$

n = ชิ้นงานที่ 1 - 10

ตารางที่ 12 แสดงถึงค่า $y_{gn} - y_{con}$ คำนวณต่อจากตาราง 2

yg1-c	yg2-c	yg3-c	yg4-c	yg5-c	yg6-c	yg7-c	yg8-c	yg9-c	yg10-c	
0.014	0.011	0.011	0.009	0.008	0.010	0.010	0.004	0.004	0.003	p2
0.008	0.009	0.005	0.008	0.018	0.011	0.012	0.012	0.009	-0.006	p3
0.019	0.018	0.008	0.004	0.014	0.018	0.014	0.008	0.009	-0.008	p4
0.014	-0.003	-0.014	0.009	-0.012	0.010	0.002	-0.010	0.006	-0.016	p5
0.023	0.002	0.018	0.005	0.012	-0.008	0.014	0.006	0.019	-0.002	p6
0.014	0.012	-0.008	0.009	-0.013	0.008	-0.011	-0.013	-0.013	-0.004	p7

c = y_{con}

yg_n = พิกัด y บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

n = ชั้นงานที่ 1 – 10

p2-7 = ตำแหน่งอ้างอิงบนตัวหลัก

ตารางที่ 13 แสดงถึงค่า $(y_{gn} - y_{con})^2$

yg1s2	yg2s2	yg3s2	yg4s2	yg5s2	yg6s2	yg7s2	yg8s2	yg9s2	yg10s2	
0.0002	0.0001	0.0001	8E-05	6E-05	0.0001	1E-04	1E-05	2E-05	8E-06	p2
6E-05	8E-05	3E-05	7E-05	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	8E-05	4E-05	p3
0.0004	0.0003	6E-05	1E-05	0.0002	0.0003	0.0002	6E-05	8E-05	6E-05	p4
0.0002	7E-06	0.0002	9E-05	0.0001	1E-04	6E-06	1E-04	3E-05	0.0002	p5
0.0005	2E-06	0.0003	3E-05	0.0002	7E-05	0.0002	4E-05	0.0003	5E-06	p6
0.0002	0.0001	6E-05	8E-05	0.0002	7E-05	0.0001	0.0002	0.0002	2E-05	p7

ygns2 = $(y_{gn} - y_{con})^2$

n = ชั้นงานที่ 1 – 10

ตารางที่ 14 แสดงถึงค่า $z_{gn} - z_{con}$ คำนวณต่อจากตาราง 3

zg1-c	zg2-c	zg3-c	zg4-c	zg5-c	zg6-c	zg7-c	zg8-c	zg9-c	zg10-c	
0.013	0.009	0.009	0.007	0.017	0.006	0.032	0.008	0.010	0.006	p2
0.008	0.011	0.002	0.010	0.007	0.006	0.037	0.003	0.016	0.008	p3
0.012	-0.003	0.004	0.004	0.005	0.009	0.017	0.013	0.009	0.013	p4
0.016	0.002	0.017	0.024	0.017	0.017	0.027	0.022	0.017	0.016	p5
0.009	-0.001	0.016	0.008	0.013	0.007	0.028	0.014	0.010	0.010	p6
0.003	0.004	0.013	0.009	-0.001	-0.002	-0.008	-0.003	-0.002	0.013	p7

c = z_{con}

zgn = พิกัด z บนแบบจำลอง มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

$$n = \text{ชิ้นงานที่ } 1 - 10$$

$$p2-7 = \text{ตำแหน่งอ้างอิงบนตัวหลัก}$$

ตารางที่ 15 แสดงถึงค่า $(z_{g_n} - z_{con})^2$

zg1s2	zg2s2	zg3s2	zg4s2	zg5s2	zg6s2	zg7s2	zg8s2	zg9s2	zg10s2	
0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0003	0.0000	0.0010	0.0001	0.0001	0.0000	p2
0.0001	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0014	0.0000	0.0003	0.0001	p3
0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0002	0.0001	0.0002	p4
0.0003	0.0000	0.0003	0.0006	0.0003	0.0003	0.0008	0.0005	0.0003	0.0002	p5
0.0001	0.0000	0.0003	0.0001	0.0002	0.0001	0.0008	0.0002	0.0001	0.0001	p6
0.0000	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0002	p7

$$zgns2 = (z_{g_n} - z_{con})^2$$

$$n = \text{ชิ้นงานที่ } 1 - 10$$

ตารางที่ 16 แสดงถึงค่า $(x_n - x_{con})^2 + (y_n - y_{con})^2 + (z_n - z_{con})^2$

sum1g	sum2g	sum3g	sum4g	sum5g	sum6g	sum7g	sum8g	sum9g	sum10g	
0.0004	0.0003	0.0004	0.0002	0.0003	0.0001	0.0011	0.0001	0.0001	0.0001	p2
0.0003	0.0004	0.0001	0.0002	0.0006	0.0002	0.0015	0.0003	0.0004	0.0003	p3
0.0006	0.0004	0.0002	0.0004	0.0002	0.0004	0.0005	0.0003	0.0004	0.0005	p4
0.0008	0.0003	0.0009	0.0007	0.0004	0.0004	0.0008	0.0007	0.0003	0.0005	p5
0.0007	0.0001	0.0007	0.0003	0.0004	0.0001	0.0010	0.0003	0.0005	0.0002	p6
0.0008	0.0004	0.0004	0.0008	0.0004	0.0002	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	p7

$$sumng = (x_{g_n} - x_{con})^2 + (y_{g_n} - y_{con})^2 + (z_{g_n} - z_{con})^2$$

$$n = \text{ชิ้นงานที่ } 1 - 10$$

ตาราง 17 แสดงถึงค่า $\sqrt{(x_n - x_{con})^2 + (y_n - y_{con})^2 + (z_n - z_{con})^2}$ ซึ่งก็คือระยะระหว่างจุดบน

แม่แบบ กับจุดบนแบบจำลองของกลุ่มที่ 1

sq1g	sq2g	sq3g	sq4g	sq5g	sq6g	sq7g	sq8g	sq9g	sq10g	
0.019	0.017	0.021	0.015	0.019	0.012	0.034	0.010	0.011	0.008	p2
0.018	0.019	0.010	0.013	0.024	0.013	0.039	0.016	0.019	0.017	p3
0.025	0.021	0.015	0.019	0.015	0.021	0.022	0.018	0.020	0.023	p4
0.028	0.018	0.031	0.026	0.021	0.020	0.028	0.026	0.018	0.023	p5
0.026	0.010	0.026	0.018	0.021	0.012	0.032	0.018	0.022	0.016	p6
0.029	0.020	0.021	0.028	0.020	0.012	0.019	0.020	0.017	0.015	p7

$$sqng = \sqrt{(x_{g_n} - x_{con})^2 + (y_{g_n} - y_{con})^2 + (z_{g_n} - z_{con})^2}$$

$$n = \text{ชิ้นงานที่ } 1 - 10$$

กลุ่มที่ 2 วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย

ตารางที่ 18 แสดงถึงค่า $\sqrt{(x_n - x_{con})^2 + (y_n - y_{con})^2 + (z_n - z_{con})^2}$ ของกลุ่มที่ 2 คำนวณต่อจาก ตาราง 4-6

sq1di	sq2di	sq3di	sq4di	sq5di	sq6di	sq7di	sq8di	sq9di	sq10di	
0.092	0.037	0.048	0.158	0.099	0.087	0.102	0.066	0.107	0.037	p2
0.102	0.083	0.052	0.104	0.073	0.079	0.120	0.059	0.071	0.083	p3
0.099	0.067	0.058	0.061	0.084	0.075	0.087	0.057	0.131	0.067	p4
0.201	0.058	0.073	0.177	0.151	0.068	0.104	0.075	0.113	0.058	p5
0.193	0.065	0.212	0.177	0.063	0.067	0.084	0.070	0.103	0.065	p6
0.122	0.050	0.058	0.072	0.100	0.078	0.116	0.086	0.105	0.050	p7

กลุ่มที่ 3 วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย และทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์

ตารางที่ 19 แสดงถึงค่า $\sqrt{(x_n - x_{con})^2 + (y_n - y_{con})^2 + (z_n - z_{con})^2}$ ของกลุ่มที่ 3 คำนวณต่อจาก ตาราง 7-9

sq1dis	sq2dis	sq3dis	sq4dis	sq5dis	sq6dis	sq7dis	sq8dis	sq9dis	sq10dis	
0.064	0.078	0.074	0.089	0.079	0.049	0.052	0.037	0.046	0.076	p2
0.064	0.088	0.061	0.122	0.079	0.100	0.080	0.083	0.077	0.106	p3
0.072	0.082	0.072	0.081	0.067	0.048	0.046	0.066	0.031	0.050	p4
0.049	0.072	0.063	0.082	0.050	0.062	0.037	0.080	0.053	0.086	p5
0.073	0.062	0.071	0.084	0.064	0.071	0.037	0.050	0.042	0.076	p6
0.057	0.084	0.060	0.100	0.079	0.071	0.053	0.075	0.063	0.079	p7

Sq1-10g หมายถึง ระยะระหว่างจุดบนแม่แบบ กับจุดบนแบบจำลองทั้ง 10 ขึ้น ของกลุ่มวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

Sq1-10di หมายถึง ระยะระหว่างจุดบนแม่แบบ กับจุดบนแบบจำลองทั้ง 10 ขึ้น ของกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย

Sq1-10dis หมายถึง ระยะระหว่างจุดบนแม่แบบ กับจุดบนแบบจำลองทั้ง 10 ขึ้น ของกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย และทำการเชื่อมติดกับภาคพิมพ์

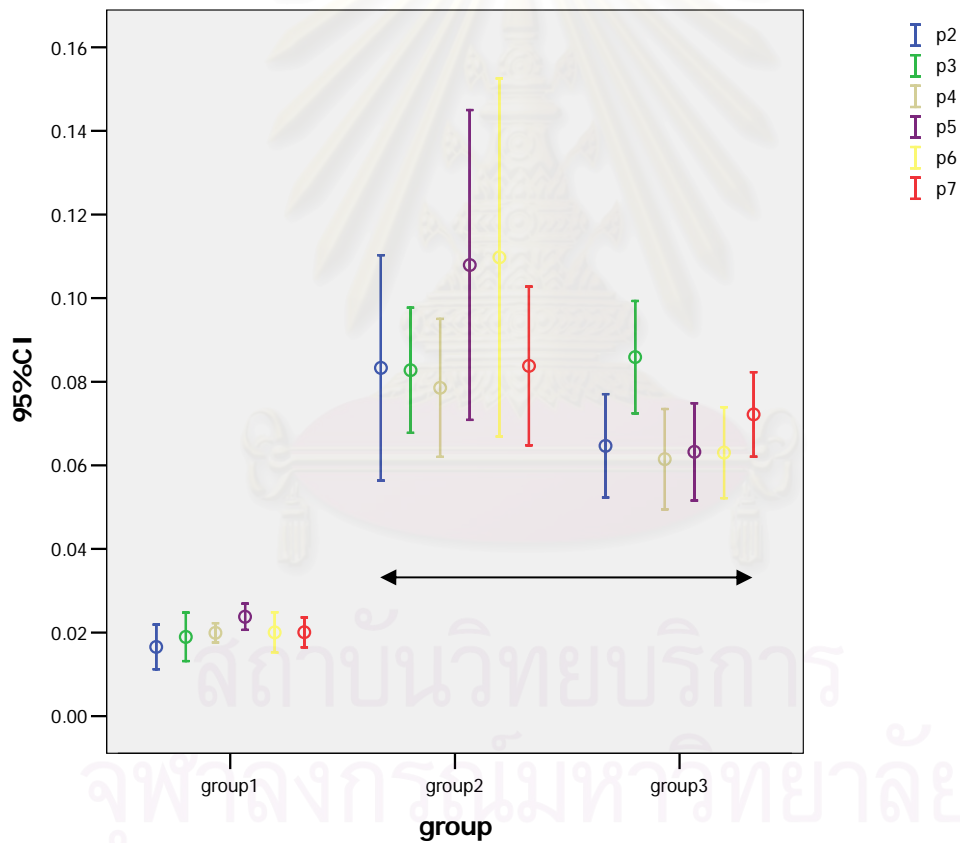
P2-7 หมายถึง จุดที่ทำเครื่องหมายไว้บนป่าของรากเทียมทั้ง 6 จุด

จากนั้นนำผลการทดลองจากตารางที่ 17 – 19 มาวิเคราะห์การกระจายของข้อมูลด้วยสถิติ โครโมโกรอฟ – สเมอนอฟ (Kolmogorov-Smirnov) พบว่าข้อมูลข้างต้นมีการกระจายตัวแบบปกติ แต่ค่าการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน (Homogeneity of variances) โดยใช้สถิติลีวินส์ เทสต์ (Levene's test) พบว่ามีค่าความแปรปรวนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 21 ดังนั้นจึงใช้สถิติแบบพาราเมตริกซ์ One-way ANOVA ชนิด Tamhane เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่มที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่ามีค่าทางสถิติดังตารางที่ 22 ซึ่งจะปฏิเสธสมมติฐาน

ว่าง (Null's Hypothesis) ของการศึกษานี้แสดงว่า วิธีพิมพ์แต่ละวิธีมีผลกับความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 20 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละจุดอ้างอิงของแต่ละวิธีพิมพ์

	p2	p3	p4	p5	p6	p7
ab im	0.017±0.0075	0.019±0.0081	0.020±0.0032	0.024±0.0044	0.020±0.0067	0.020±0.005
direct	0.083±0.0377	0.083±0.0209	0.079±0.0231	0.108±0.0518	0.110±0.0599	0.084±0.0265
di sp	0.065±0.0173	0.086±0.0188	0.062±0.0168	0.063±0.0163	0.063±0.0152	0.072±0.0141



หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

รูปที่ 47 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 21 แสดงการวิเคราะห์ความเหมือนของความแปรปรวน

Test of Homogeneity of Variances

	Levene Statistic	df1	df2	Sig.
p2	7.711	2	27	.002
p3	3.041	2	27	.064
p4	6.973	2	27	.004
p5	15.260	2	27	.000
p6	21.452	2	27	.000
p7	11.219	2	27	.000

ตารางที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่มโดยใช้สถิติ One-way ANOVA Welch test

Robust Tests of Equality of Means

		Statistic(a)	df1	df2	Sig.
p2	Welch	42.569	2	14.200	.000
p3	Welch	78.798	2	15.078	.000
p4	Welch	56.586	2	12.657	.000
p5	Welch	37.699	2	12.887	.000
p6	Welch	40.936	2	14.032	.000
p7	Welch	79.625	2	13.674	.000

a. Asymptotically F distributed.

จากตารางพบว่าในทุกตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้บนตัวหลัก (p2-p7) ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในแต่ละวิธีพิมพ์ ซึ่งเมื่อพิจารณาต่อไปว่าวิธีพิมพ์ใดที่ต่างกันบ้าง โดยใช้สถิติ Tamhane จะพบว่าแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์โดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด เช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ มีการเบี่ยงเบนไปจากแม่แบบน้อยกว่าวิธีพิมพ์วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดรวม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้ง 6 จุด ($p = 0.001, 0.000, 0.000, 0.002, 0.003, 0.000$ ตามลำดับ) และน้อยกว่าวิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดและทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์ ($p = 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000, 0.000$ ตามลำดับ) ส่วนวิธีพิมพ์โดยตรงทั้งแบบที่ทำการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์นั้น แบบจำลองที่ได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.446, 0.980, 0.212, 0.073, 0.108, 0.566$ ตามลำดับ)

ตารางที่ 23 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละกลุ่มโดยใช้สถิติ Tamhane

Multiple Comparisons

Variable	(I) GROUP	(J) GROUP	Sig.	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
P2	ab imp	Direct*	.001	-.101693	-.031810
		di splint*	.000	-.064543	-.031649
	direct	abut imp*	.001	.031810	.101693
		di splint	.446	-.017375	.054685
	di sp	abut imp*	.000	.031649	.064543
P3		direct	.446	-.054685	.017375
	ab imp	Direct*	.000	-.083543	-.044037
		di splint*	.000	-.084797	-.049063
	direct	abut imp*	.000	.044037	.083543
		di splint	.980	-.026561	.020281
P4	di sp	abut imp*	.000	.049063	.084797
		direct	.980	-.020281	.026561
	ab imp	Direct*	.000	-.079968	-.037255
		di splint*	.000	-.057130	-.025980
	direct	abut imp*	.000	.037255	.079968
P5		di splint	.212	-.006916	.041028
	di sp	abut imp*	.000	.025980	.057130
		direct	.212	-.041028	.006916
	ab imp	Direct*	.002	-.132071	-.036237
		di splint*	.000	-.054616	-.024284
P6	direct	abut imp*	.002	.036237	.132071
		di splint	.073	-.003756	.093165
	di sp	abut imp*	.000	.024284	.054616
		direct	.073	-.093165	.003756
	ab imp	Direct*	.003	-.145073	-.034324
P7		di splint*	.000	-.057503	-.028519
	direct	abut imp*	.003	.034324	.145073
		di splint	.108	-.009002	.102378
	di sp	abut imp*	.000	.028519	.057503
		direct	.108	-.102378	.009002
P7	ab imp	Direct*	.000	-.088322	-.039099
		di splint*	.000	-.065383	-.038831
	direct	abut imp*	.000	.039099	.088322
		di splint	.566	-.014230	.037437
	di sp	abut imp*	.000	.038831	.065383
	direct	.566	-.037437	.014230	

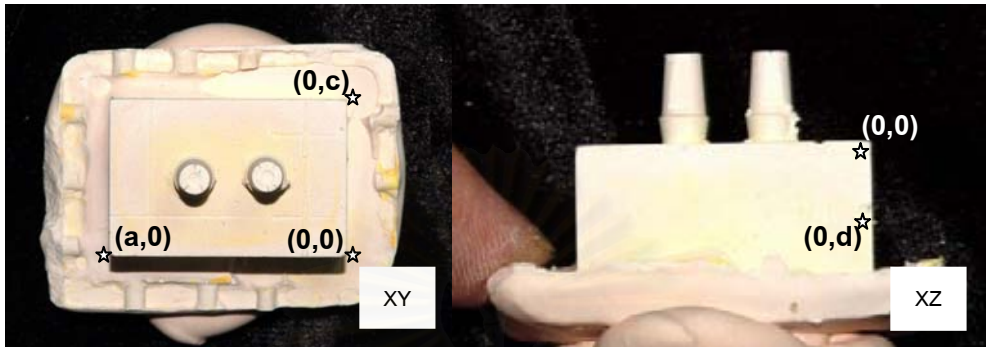
* The mean difference is significant at the .05 level.

ab imp คือ วิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ

direct คือ วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย

di sp คือ วิธีพิมพ์โดยตรงแบบใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมด้วย และทำการเชื่อมติดกับถาดพิมพ์

ผลของการขยายตัวของปูนรวมกับการหดตัวของวัสดุพิมพ์นั้นจะวัดเป็น 3 แกน ตามแกน x,y,z โดยแนวแกน x จะวัดจากจุด (0,0) ไปจนถึงจุด (a,0) แนวแกน y วัดจาก (0,0) ไปจนถึงจุด (0,c) และแนวแกน z วัดจากจุด (0,0) ไปจนถึงจุด (0,d) ดังรูป



รูปที่ 48 แสดงพิกัดที่ใช้วัดการขยายตัวของปูน

ค่าที่ได้เฉลี่ยของแบบจำลองออกมาดังนี้ พิกัด (a,0) คือ (25.968,0) พิกัด (0,c) คือ (0,17.220) พิกัด (0,d) คือ (0,-6.293) จากนั้นนำค่าเหล่านี้มาเทียบกับแม่แบบ ซึ่งมีพิกัดดังนี้ พิกัด (a,0) คือ (25.928,0) พิกัด (0,c) คือ (0,17.182) พิกัด (0,d) คือ (0,-6.281) เมื่อคิดเป็นร้อยละการขยายตัวจะได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} \text{แกน x ขยายตัว} &= 100(25.968 - 25.928)/25.928 \% \\ &= 0.15 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แกน y ขยายตัว} &= 100(17.220 - 17.182)/17.182 \% \\ &= 0.22 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แกน z ขยายตัว} &= 100(-6.293 - (-6.281))/-6.281 \% \\ &= 0.19 \% \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย

การทำฟันปลอมร่วมกับรากเทียมนั้นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่งคือการพิมพ์ปาก เพราะเนื่องจากการสร้างฟันปลอมส่วนใหญ่ทำอยู่บนแบบจำลอง ดังนั้นการได้มาซึ่งแบบจำลองที่เหมือนกับแม่แบบจึงมีผลกับความสำเร็จของงานเป็นอย่างมาก วิธีพิมพ์ปากมีอยู่มากมายตามแต่บริษัทผู้ผลิตรากเทียมได้แนะนำ หรือตามแต่การนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งวิธีพิมพ์นั้นสามารถจัดเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 3 วิธี ดังนี้ วิธีพิมพ์รากเทียมแบบที่ไม่ใช้ตัวต่อถอดถ่ายถอดเช่นเดียวกับฟันปลอม ติดแน่นบนฟันธรรมชาติ วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อถอดถ่ายถอด และวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อถอดถ่ายถอดเชื่อมติดกับถาพิมพ์

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียม 3 วิธี ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยมีสมมติฐานการวิจัยว่า ความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียม 3 วิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และไม่ว่าแบบจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในทิศทางใดก็ตามจะทำให้เกิดอันตรายขึ้นกับกระดูกรอบๆรากเทียมและส่วนประกอบต่างๆของรากเทียมได้เช่นเดียวกัน (Zervas และคณะ, 1999) ดังนั้นการใช้สถิติเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวิธีพิมพ์จึงไม่นำทิศทางเข้ามาพิจารณา ส่วนทิศทางที่มีความเบี่ยงเบนไปนั้นจะศึกษาจากกราฟการกระจายเพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์ผลต่อไป

วิจารณ์วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การวิจัยนี้ต้องการเปรียบเทียบว่าวิธีพิมพ์รากเทียมแบบใดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งควรจะวัดที่วิธีพิมพ์ แต่ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือทำให้จำเป็นต้องวัดที่แบบจำลองแทนทำให้มีตัวแปรเพิ่มเข้ามาอีก คือ การหดตัวของวัสดุพิมพ์ และการขยายตัวของปูนขณะก่อตัว ทำให้ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้นั้นมีผลจากสองปัจจัยนี้รวมเข้าไปด้วย ดังนั้นในระหว่างขั้นตอนการทดลองจึงพยายามทำให้ความคลาดเคลื่อนจากสองปัจจัยนี้เกิดขึ้นน้อยที่สุด และเกิดใกล้เคียงกันมากที่สุดในทุกๆขั้นตอนตัวอย่าง การควบคุมนี้เริ่มตั้งแต่ อัตราส่วนน้ำต่อผงปูนที่ใช้ในการผสม วิธีการผสมโดยใช้เครื่องผสมสุญญากาศ ระยะเวลาในการผสม ระยะเวลาทำงาน และระยะเวลาก่อตัว ซึ่งทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด และเหมือนกันทุกครั้งที่ทำารผสม ในส่วนของวัสดุพิมพ์ก็เช่นเดียวกัน สัดส่วนของส่วนประกอบ ระยะเวลาทำงาน ระยะเวลาก่อตัว ระยะเวลาคืนตัว เป็นสิ่งสำคัญมาก อีกทั้งคุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่ใช้ คุณสมบัติแม่แบบ และ

สิ่งแวดล้อม ได้ทำการควบคุมให้เท่ากับที่แนะนำโดยบริษัทผู้ผลิต และเหมือนกันในทุกๆครั้งที่ทำการทดลองอีกทั้งความหนาของวัสดุพิมพ์ เพื่อตัดปัญหาเรื่องความไม่สม่ำเสมอจึงได้ทำการใช้สภาพพิมพ์อันเดิมตลอดการทดลอง

แม่แบบที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำจากโลหะเนื่องจากทนต่อรอยขีดข่วนในระหว่างการทดลองซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากเพราะระดับความละเอียดที่ใช้วัดสูงถึง 1 ไมโครเมตร รอยเพียงนิดเดียวก็ทำให้จุดอ้างอิงเปลี่ยนตำแหน่งได้ ส่วนจากเทียมนที่ฝังอยู่ทำให้ขนานกันมากที่สุดเพื่อลดการบิดเบี้ยวของวัสดุพิมพ์ขณะดึงสภาพพิมพ์ออก แต่รอยต่อระหว่างตัวต่อรอยต่อถ่ายทอดหรือตัวหลักกับรากเทียมนั้นอยู่ภายนอกฐานโลหะ ซึ่งต่างจากในทางคลินิกที่รอยต่อนี้จมอยู่ใต้ขอบเหงือก เมื่อพิมพ์แม่แบบแล้วรอยต่อระหว่างตัวต่อรอยต่อถ่ายทอดกับรากเทียมจำลองจะจมอยู่ในรอยพิมพ์ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าแบบสนิทหรือไม่ จึงต้องอาศัยประแจควบคุมแรงบิดที่ได้ทำการทดสอบก่อนทดลองแล้วว่าที่แรง 30 นิวตันเซนติเมตร สามารถทำให้รอยต่อเหล่านี้แนบสนิทพอดีในส่วนของจุดอ้างอิงที่ใช้วัดนั้นใช้บริเวณมุมของฐานโลหะ และทำรอยบากที่ตัวหลักเนื่องจากเมื่อนำแบบจำลองไปส่องผ่านกล้องกำลังขยาย 50 เท่า ทำให้จุดอ้างอิงที่ทำได้เห็นเป็นลักษณะโค้งกระบวนกรวัดจึงจะทำการขยับให้เส้นกาะบาทในเลนส์แนบกับผิวแบบจำลอง แล้วอ่านค่าจากจุดตัดของเส้นกาะบาทดังรูป ซึ่งอาจเป็นผลทำให้มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่ได้ทำการควบคุมโดยฝึกวัดจุดต่างๆเหล่านี้จนผู้ทดลองสามารถวัดซ้ำที่เดิมได้ที่มีความคลาดเคลื่อน ± 2 ไมโครเมตร และขณะทดลองจะทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยมาใช้



☆ = ตำแหน่งที่ใช้อ่านค่าจากกล้อง

การทดลองนี้วัดตำแหน่งจุดต่างๆออกมาเป็นลักษณะ 3 มิติ ในรูปพิกัด (x,y,z) เนื่องจากข้อมูลประเภทนี้สามารถบอกรายละเอียดได้ดีกว่า 2 มิติ และข้อมูลประเภทนี้ยังสามารถนำไปคำนวณหาระยะทางระหว่างจุดได้ อีกทั้งบนบ่าของตัวหลักทำจุดอ้างอิงไว้ 3 จุดเพื่อแสดงระนาบของตัวหลักที่เอียงไปได้เช่นกัน ส่วนเครื่องมือวัดนั้นเนื่องจากงบประมาณที่จำกัดทำให้การทดลองนี้จำเป็นต้องใช้กล้อง measurement microscope แทนเครื่องมือเครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM) ซึ่งเครื่อง CMM นี้มีความคลาดเคลื่อน ± 3 ไมโครเมตร (Mulcahy และคณะ, 2000) แสดงถึงข้อมูลที่ได้จากกล้อง measurement microscope นั้นมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกับเครื่อง CMM

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างวิธีพิมพ์โดยตรง และวิธีพิมพ์โดยอ้อม (Assif และคณะ, 1992; Barrett และคณะ, 1993; Daoudi และคณะ, 2001; Herbst และคณะ, 2000; Liou และคณะ, 1993; Naconecy และคณะ, 2004) สรุปได้ว่าวิธีพิมพ์โดยอ้อมมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวิธีพิมพ์โดยตรงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่วิธีพิมพ์โดยตรงแบบที่มีการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดนั้นไม่สามารถสรุปได้ การทดลองครั้งนี้จึงทำการศึกษาความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์โดยตรงทั้งแบบที่มีการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด และเพิ่มกลุ่มวิธีพิมพ์โดยไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปloomติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ

อภิปรายผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการทดลองนั้นปฏิเสธสมมติฐานว่างของการวิจัยนั้นหมายถึง ความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียม 3 วิธี มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแบบจำลองที่ได้จากวิธีพิมพ์รากเทียมแบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปloomติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ มีความคลาดเคลื่อนของจุด p2-p7 ไปจากแม่แบบน้อยที่สุด (0.0166 ± 0.0075 , 0.019 ± 0.0081 , 0.0199 ± 0.0032 , 0.0238 ± 0.0044 , 0.02 ± 0.0067 , 0.02 ± 0.005) เมื่อเทียบกับอีก 2 วิธีพิมพ์ที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญ ส่วนวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเชื่อมติดกับภาพพิมพ์นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อใช้สถิติ Tamhane ทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับวิจัยก่อนหน้าที่ทำการศึกษาวีพิมพ์โดยการเชื่อม และไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด (Herbst และคณะ, 2000; Hsu และคณะ, 1993; Kim และคณะ, 2006)

ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ได้จากการพิมพ์นั้นมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยระหว่างขั้นตอนการพิมพ์ ตั้งแต่ ลักษณะของแม่แบบ ความขนาน ส่วนคอดเว้าต่างๆ ลักษณะของวัสดุพิมพ์อันได้แก่ สัดส่วนในการผสม วิธีการผสม การหัดตัวขณะก่อตัว ความหนืด ระยะเวลาก่อตัว ระยะเวลาทำงาน อุณหภูมิ การยึดติดกับลาดพิมพ์ ความหนาของวัสดุ วิธีการพิมพ์แต่ละวิธีก็ให้ผลที่แตกต่างกัน อีกทั้งขั้นตอนการเทแบบจำลองก็ยังมีผลเช่น การขยายตัวขณะก่อตัวของปูนที่เกิดขึ้น ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ได้พยายามควบคุมตัวแปรต่างๆเหล่านี้ให้ใกล้เคียงกันที่สุด โดยเหลือแต่ปัจจัยที่จะทำการศึกษาคือวิธีการพิมพ์เท่านั้นที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีการพิมพ์แต่ละวิธีพิมพ์มีปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันดังนี้

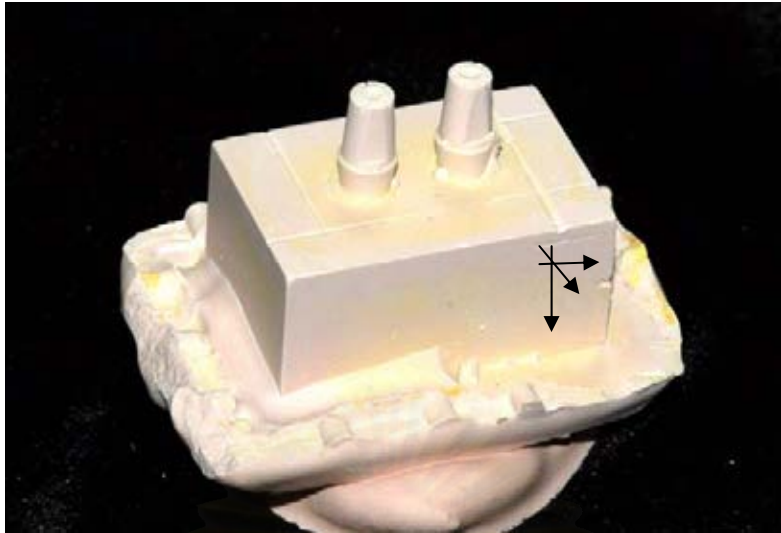
วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด มีปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนคือ รอยต่อระหว่าง ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียม ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียมจำลอง ราก

เทียมจำลองกับตัวหลัก แรงที่ใช้ในการขันสกรูต่างๆ ความสามารถของวัสดุพิมพ์ในการคงไว้ซึ่งตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอด การหดตัวของวัสดุพิมพ์ การขยายตัวของปูน

วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเชื่อมติดกับถาพิมพ์ มีปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนคือ รอยต่อระหว่าง ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียม ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียมจำลอง รากเทียมจำลองกับตัวหลัก แรงที่ใช้ในการขันสกรูต่างๆ ความสามารถของวัสดุพิมพ์ในการคงไว้ซึ่งตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอด การหดตัวของอะคริลิกเรซินที่ใช้เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาพิมพ์ การหดตัวของวัสดุพิมพ์ การขยายตัวของปูน

วิธีพิมพ์รากเทียมแบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ แม้ว่าจะไม่มีความคลาดเคลื่อนจากการเชื่อมต่อของส่วนประกอบต่างๆ แต่ตัวหลักเกิดจากการลอกเลียนแบบของวัสดุพิมพ์และการเทปูน ซึ่งสองปัจจัยนี้จะมีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลอง อีกทั้งการหดตัวของวัสดุพิมพ์ การขยายตัวของปูนของฐานก็ยังเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

จากผลการทดลองพบว่ากลุ่มวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับพื้นปลอมติดแน่นบนพื้นธรรมชาติ มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงถึงผลจากการหดตัวของวัสดุพิมพ์ และขยายของปูนมีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนจากการเชื่อมต่อของส่วนประกอบต่างๆ และความสามารถของวัสดุพิมพ์ในการรักษาตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอดในอีก 2 วิธีพิมพ์ เมื่อพิจารณาทิศการกระจายของกลุ่มนี้พบว่า ทุกจุดอ้างอิงบนตัวหลักรากเทียมของแบบจำลองมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+x, +y, +z$ และมีลักษณะการเบี่ยงเบนในแต่ละแกนใกล้เคียงกัน ซึ่งจุดที่มากที่สุดแต่ละแกนมีค่างนี้ แกน x จุด $p7$ มีการกระจายสูงสุด 40 ไมโครเมตร แกน y จุด $p5$ มีการกระจายสูงสุด 30 ไมโครเมตร แกน z จุด $p3$ มีการกระจายสูงสุด 35 ไมโครเมตร ค่าการกระจายตัวนี้มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 แกนซึ่งเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นแล้วมีค่าน้อยกว่ามาก เหตุผลที่ได้ผลเช่นนี้เพราะไม่ต้องมีรอยต่อระหว่างตัวต่อยอดถ่ายทอด กับรากเทียม และรากเทียมจำลอง อีกทั้งไม่ต้องอาศัยการรักษาตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอดในวัสดุพิมพ์ ที่เป็นต้นเหตุของความคลาดเคลื่อน จากงานวิจัยของ kim (Kim และคณะ, 2006) พบว่ารอยต่อเหล่านี้มีความคลาดเคลื่อนในแกน x, y และ z อีกเหตุผลหนึ่งที่แต่ละจุดบนตัวหลักนั้นเคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+x, +y, +z$ คือการขยายตัวของฐานปูนในทุกทิศทางทำให้จุดอ้างอิง $(0,0,0)$ ห่างจากพิกัดบนตัวหลักดังรูป แกน x ขยายตัว 0.15 % แกน y ขยายตัว 0.22 % แกน z ขยายตัว 0.19 % ซึ่งลักษณะของจุดอ้างอิงนี้เรียกว่า relative reference (Nicholls, 1977, , 1978, , 1980)



รูปที่ 49 แสดงทิศทางการขยายตัวของฐานปูนหนึ่งห่างจากตัวหลัก

ผลของกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดทั้งที่มีและไม่มี การเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับภาคพิมพ์ พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังตารางที่ 4.24 ซึ่งสอดคล้องกับหลายงานวิจัย (Herbst และคณะ, 2000; Hsu และคณะ, 1993; Kim และคณะ, 2006) kim และคณะ (Kim และคณะ, 2006) กล่าวว่า วิธีพิมพ์โดยตรงที่มีการเชื่อมหรือไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด แต่ละขั้นตอนนั้นจะคลาดเคลื่อนต่างกัน แต่เมื่อรวมผลของความคลาดเคลื่อนทั้งหมดแล้วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองเทียบกับแม่แบบ ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการพิมพ์และวัสดุพิมพ์ เช่นการหดตัวของเนื้อปูนนั้น วิธีพิมพ์ชนิดไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า แต่ความคลาดเคลื่อนของรากเทียมจำลองที่อยู่แบบจำลองที่เป็นผลมาจากการขยายตัวของปูน กลุ่มที่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ส่วนความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียม และรากเทียมจำลองภายใต้ความสามารถของเคลือบกลึงรากเทียมในการทำให้แนบสนิทมีค่าถึง 30 ไมโครเมตร กลุ่มที่มีการเชื่อมต่อนั้นจะมีผลของ c-factor มาเกี่ยวข้อง โดย c-factor คือ สัดส่วนของ จำนวนด้านที่มีการเชื่อมยึดต่อด้านที่ไม่มีการเชื่อมยึด ซึ่งเกี่ยวข้องคือจะมีแรงดึงเพิ่มขึ้นในวัสดุพิมพ์เนื่องจากมีส่วนของอะคริลิกเพิ่มขึ้นเป็นขอบเขต และอีกทั้งการหดตัวของอะคริลิกเรซินยังทำให้เกิดความเค้นตึงภายในซึ่งจะคลายออกมาเมื่อแกะออกจากแม่แบบทำให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อช่วยให้ความมั่นคงมากขึ้นในขั้นตอนต่างๆ แต่ในการวิจัยนี้ไม่ได้ทำการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้าด้วยกันเอง แต่ทำการเชื่อมเข้ากับภาคพิมพ์ ตามที่ Assif ได้แนะนำ (Assif และคณะ, 1994) ซึ่งจะช่วยให้มีความมั่นคงมากขึ้น และการหดตัวเข้าหากันลดลงเพราะควบคุมให้ช่องว่างระหว่างตัวต่อยอดถ่ายทอด มีความสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามผลที่ได้ก็ยังไม่แตกต่างระหว่างการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด ส่วนหนึ่ง

เป็นเพราะอะคริลิกที่ใช้เชื่อม หลังจากนาที่ที่ 17 ไปแล้วยังมีการหดตัวต่อไปอีก 1.4 เปอร์เซ็นต์ ใน 24 ชั่วโมง (Mojon และคณะ, 1990) ซึ่งขณะนั้นตัวต่อยอหดถ่ายทอดอยู่เป็นอิสระจากรากเทียมจึงอาจส่งผลกับความคลาดเคลื่อนนี้ได้ และความคลาดเคลื่อนจากรอยต่อยอระหว่างตัวต่อยอหดถ่ายทอดกับส่วนอื่นๆ แม้ว่าจะควบคุมให้ช่องว่างเป็น 0 ไมโครเมตรแล้วก็ตามก็เป็นแคในแนวแกน z แต่แกนอื่นๆก็ยังมี ซึ่งสังเกตได้จากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนและกราฟของพิกัดจุด (รูปที่ 43, 44) จะคลาดเคลื่อนในแกน xy มากกว่าแกน z เกือบทุกจุดมีการเคลื่อนที่ไปในทิศ +x,+y,-z ซึ่งทิศ -z หมายถึงแบบจำลองที่ได้ตัวหลักตั้ยกว่าแม่แบบเป็นเพราะการขยับออกจากรอยพิมพ์ของวิธีพิมพ์โดยตรงชนิดไม่เชื่อมต่อกัน แต่เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่ากลุ่มที่ไม่ได้เชื่อมตัวต่อยอหดมีการกระจายมากกว่าในแนวแกน x จุด p6 มีการกระจายสูงสุด 195 ไมโครเมตร และแกน y จุด p6 มีการกระจายสูงสุด 204 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับกลุ่มที่เชื่อมติดกับถาดพิมพ์ ซึ่งแกน x จุด p3 มีการกระจายสูงสุด 67 ไมโครเมตร และแกน y จุด p3 มีการกระจายสูงสุด 97 ไมโครเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการใช้อะคริลิกเข้ามาเชื่อมจะช่วยให้มีความมั่นคงสูงขึ้นขณะทำการขันรากเทียมจำลองเข้าไปในตัวต่อยอหดถ่ายทอดที่อยู่ในรอยพิมพ์ แต่ผลในแนวแกน z กลับไม่เป็นเช่นนั้นโดยกลุ่มที่ทำการเชื่อมตัวต่อยอหดถ่ายทอด แกน z จุด p2 มีการกระจายสูงสุด 67 ไมโครเมตร มีการกระจายที่สูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้เชื่อมตัวต่อยอหดถ่ายทอด แกน z จุด p7 มีการกระจายสูงสุด 30 ไมโครเมตร แสดงว่าวัสดุพิมพ์ และอะคริลิกที่ใช้เชื่อมตัวต่อยอหดถ่ายทอดไม่แข็งแรงพอต่อการรักษาตำแหน่งของตัวต่อยอหดถ่ายทอดให้คงที่ในรอยพิมพ์

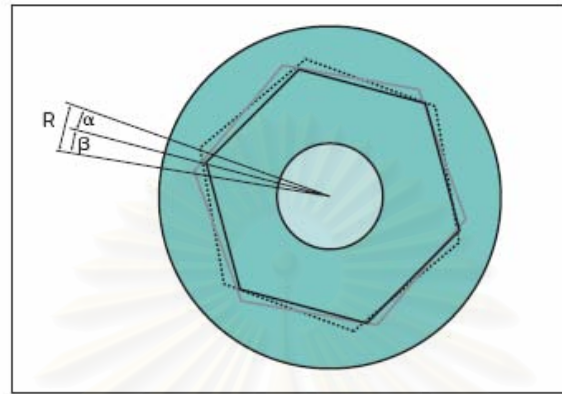
เมื่อพิจารณาระยะทางความแตกต่างระหว่างแม่แบบ กับแบบจำลอง จากตารางที่ 20 พบว่า วิธีพิมพ์รากเทียมแบบไม่ใช้ตัวต่อยอหดถ่ายทอดที่ระดับตัวหลัก จุดที่มีการเบี่ยงเบนมากที่สุดคือจุด p5 มีค่าเฉลี่ยเพียง 24 ไมโครเมตร เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นได้แก่ วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอหดถ่ายทอดเชื่อมติดกับถาดพิมพ์ จุด p3 มีค่าเฉลี่ยถึง 86 ไมโครเมตร และวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอหดถ่ายทอด จุด p6 มีค่าเฉลี่ยถึง 108 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาพิจารณานัยสำคัญทางสถิติ พบว่า กลุ่มวิธีพิมพ์รากเทียมแบบไม่ใช้ตัวต่อยอหดถ่ายทอดที่ระดับตัวหลัก มีความเบี่ยงเบนแตกต่างจากสองวิธีที่เหลืออย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่สองวิธีนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แม้ว่าวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอหดถ่ายทอดเชื่อมติดกับถาดพิมพ์ จะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอหด แต่สองกลุ่มหลังนี้มีค่าการกระจายที่สูงมากทำให้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามมีหลายงานวิจัยที่พบว่า วิธีการพิมพ์รากเทียมแบบเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอหดถ่ายทอดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Assif และคณะ, 1999; Naconezy และคณะ, 2004) ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ stain gauge วัดโครงโลหะที่ได้จากแม่แบบเมื่อนำไปใส่

ลงในแบบจำลองที่ได้จากแต่ละวิธีพิมพ์ แล้วพบว่า การเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดจะช่วยให้แบบจำลองที่ได้มีความเที่ยงตรงมากกว่า เพราะอะคริลิกที่ใช้เชื่อมจะช่วยคงตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอดให้คงที่ระหว่างการขึ้นสกรู ด้านการหดตัวของวัสดุพิมพ์ และการขยายตัวของปูน

Die spacer เป็นสิ่งที่ต้องทาเสมอในขั้นตอนสร้างโครงโลหะครอบฟัน เพื่อช่วยชดเชยความคลาดเคลื่อนต่างๆที่เกิดขึ้นและเป็นที่ยอมรับของซีเมนต์ ซึ่งทาง American Dental Association specification No.8 แนะนำว่าควรมีความหนาไม่เกิน 25 ไมโครเมตร แต่จากการวิจัยพบว่าในทางคลินิกช่องว่างระหว่างครอบฟัน กับฟันหลักมีค่าถึง 73.4 ไมโครเมตร เมื่อทาหนึ่งชั้น (Emtiaz และ Goldstein, 1997) ดังนั้นจากผลที่ได้จะพบว่ากลุ่มวิธีพิมพ์รากเทียมแบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ จะให้แบบจำลองที่เที่ยงตรงและแม่นยำที่สุด และความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดคือ 24 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นเพียงกลุ่มเดียวที่ระยะนี้ยังอยู่ในขอบเขตของ die spacer ผลที่ได้เช่นนี้แสดงถึงว่า การขยายตัวของปูนและการหดตัวของวัสดุพิมพ์ มีผลน้อยกว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอด ส่วนวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดระหว่างกลุ่มที่มีการเชื่อมและไม่เชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดนั้นแม้ว่าจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ลักษณะการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนจะพบว่ากลุ่มที่มีการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด มีการกระจายตัวน้อยกว่าและคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแสดงว่าการใช้อะคริลิกเข้ามาเชื่อมจะช่วยให้เกิดความมั่นคงขึ้นขณะทำการขึ้นรากเทียมจำลองเข้าไปในตัวต่อยอดถ่ายทอดที่อยู่ในรอยพิมพ์ แม้ว่าวิธีพิมพ์โดยใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดทั้ง 2 วิธีจะไม่แตกต่างกันทางสถิติก็ไม่ได้หมายความว่าทั้ง 2 วิธีนี้ไม่แตกต่างกัน ซึ่งผลเช่นนี้อาจมาจากขนาดของกลุ่มตัวอย่างยังน้อยเกินไปเนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณและเวลา ถ้าหากเพิ่มขนาดของกลุ่มตัวอย่างอาจพบนัยสำคัญของความแตกต่างนี้

ลักษณะรูปร่างของตัวต่อยอดถ่ายทอด มีความสำคัญมากกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ตัวต่อยอดถ่ายทอดของวิธีพิมพ์โดยอัดรวมจะมีลักษณะสอบเล็กน้อย เพื่อให้สามารถใส่กลับเข้าไปในรอยพิมพ์ได้ และมีรอยบากเพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงในแนวการหมุน แต่ตัวต่อยอดถ่ายทอดของวิธีพิมพ์โดยตรงเนื่องจากไม่ต้องแกะออกจากรอยพิมพ์จึงควรเป็นลักษณะขนานและมีรอยคอด รอยบาก หรือเป็นมุมเพื่อช่วยยึดกับวัสดุพิมพ์ (Misch, 2005) และก็มีคำแนะนำว่าอาจจะต้องมีการเป่าทรายหรือทากาวยึดร่วมด้วย (Vigolo, Majzoub และ Cordioli, 2003; Vigolo และคณะ, 2000) แต่เนื่องจากตัวต่อยอดถ่ายทอดระบบ Spline แบบวิธีพิมพ์โดยตรงมีลักษณะสอบค่อนข้างมาก และรอยบากค่อนข้างตื้นทำให้ไม่สามารถงัดได้ในรอยพิมพ์ได้ดีพอ อีกทั้งยังไม่มียอดคอดเพื่อต้านการเคลื่อนขยับในแนวตั้งทำให้ความคลาดเคลื่อนในแนวนอนเพิ่มเข้ามา อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนจากรอยต่อ (connection) ต่างๆอยู่ทำให้เป็นข้อเสียของการพิมพ์โดยใช้

ตัวต่อยอดถ่ายทอดที่ระดับรากเทียม ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากรอยต่อนี้มีทั้งในแนว แกน x,y,z หรืออาจเป็นการหมุน โดย Vigolo และคณะ (Vigolo และคณะ, 2006) ได้ทำการศึกษาความคลาดในการหมุนตามแนวแกนของรากเทียม พบว่าระหว่างรอยต่อระหว่างตัวหลักกับรากเทียมสามารถหมุนได้ถึง 3 องศา ดังรูป



รูปที่ 50 แสดงการหมุนขยับของจตุรรอยต่อ

ในส่วนของกระบวนการวัดการกำหนดจุดอ้างอิงเป็นสิ่งสำคัญมาก บางการศึกษา กำหนดให้จุด (0,0,0) อยู่บนตัวหลักตัวใดตัวหนึ่ง (Kim และคณะ, 2006) จะมีข้อเสียคือถ้าตัวหลักเป็นตัวที่เบี่ยงเบนไป จะทำให้แปลผลเป็นว่าตัวหลักอื่น ๆ มีความคลาดเคลื่อนทั้งหมด การวิจัยครั้งนี้จึงเลือกให้จุดอ้างอิง (0,0,0) อยู่บนฐานแบบจำลองแทน (Herbst และคณะ, 2000) แต่ข้อเสียคือผลจากการหดตัวของวัสดุพิมพ์ และขยายตัวของปูนจะเข้ามามีผลด้วย จึงได้ทำการวัดค่าการหดขยายนี้ออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อร่วมประกอบการพิจารณา

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาระยะเวลาทางของความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวหลัก และนำพิกัดที่วัดได้ไปสร้างเป็นภาพ 3 มิติจำลองลักษณะที่เบี่ยงเบนไปของตัวหลัก
2. ปรับปรุงกระบวนการเทแบบจำลองให้มีความแข็งแรงมากขึ้นและศึกษาอัตราการแตกหักของตัวหลักในกลุ่มวิธีพิมพ์แบบไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ
3. ศึกษาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อต่างๆในลักษณะการหมุน
4. การใช้เครื่อง measurement microscope สามารถวัดผลได้เช่นเดียวกับเครื่อง CMM โดยไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่า สาเหตุความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ได้จากการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดร่วมขณะทำการพิมพ์รากเทียมมาจากวัสดุพิมพ์ไม่สามารถรักษาตำแหน่งของตัวต่อยอดถ่ายทอดให้คงที่ได้เพียงพอ อีกทั้งยังเป็นผลมาจากการเคลื่อนขยับของรอยต่อระหว่างตัวต่อยอดถ่ายทอดกับรากเทียม และรากเทียมจำลองในแนวระนาบ โดยผลจากความคลาดเคลื่อนนี้มีค่ามากกว่าผลของการหดตัวของวัสดุพิมพ์ และการขยายตัวของปูนในการลอกเลียนลักษณะตัวหลักของกลุ่มที่ไม่ได้ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดในการพิมพ์

วิธีพิมพ์รากเทียมแต่ละวิธีมีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลองที่ได้ โดยกลุ่มที่มีความเที่ยงตรงสูงสุดคือกลุ่มวิธีพิมพ์แบบที่ไม่ใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเช่นเดียวกับฟันปลอมติดแน่นบนฟันธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจากกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

แม้ว่าการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์ของกลุ่มวิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดจะช่วยให้มีเสถียรภาพมากขึ้นระหว่างขั้นตอนพิมพ์รากเทียม แต่ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกับกลุ่มที่ไม่ได้ทำการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอด แสดงถึงการเชื่อมตัวต่อยอดถ่ายทอดเข้ากับถาดพิมพ์ไม่มีผลกับความเที่ยงตรงของแบบจำลอง

วิธีพิมพ์โดยตรงร่วมกับการใช้ตัวต่อยอดถ่ายทอดเชื่อม และไม่เชื่อมติดกับถาดพิมพ์ให้ความเที่ยงตรงของแบบจำลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

รายการอ้างอิง

- Adell, R., Lekholm, U., Rockler, B. and Branemark, P. I. 1981. A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Int J Oral Surg 10:387-416.
- Agar, J. R., Cameron, S. M., Highbanks, J. C. and Parker, M. H. 1997. Cement removal from restorations luted to titanium abutments with simulated subgingival margins. J Prosthet Dent 78(1): 43-7.
- Akca, K. and Cehreli, M. C. 2004. Accuracy of 2 impression techniques for ITI implants. Int J Oral Maxillofac Implants 19(4): 517-23.
- albrektsson, T. 1988. A multicenter report on osseointegrated oral implants. J Prosthet Dent 60:75-84.
- Albrektsson, T., et al. 1988. Osseointegrated oral implants. A Swedish multicenter study of 8,139 consecutively inserted Nobelpharma implants. J Periodontal 59:287-296.
- Aparicio, C. 1994. A new method to routinely achieve passive fit of ceramometal prostheses over Branemark osseointegrated implants: A two-year report. Int J Oral Maxillofac Implants 7:105-111.
- Aparicio, C. 1995. A new method to routinely achieve passive fit of an interim restoration supported by Branemark implants: A technical note. Int J Oral Maxillofac Implants 10:614-618.
- Asgar, K. 1971. Elastic impression materials. Dent Clin North Am 15:81-98.

- Assif, D., Fenton, A., Zarb, G. and Schmitt, A. 1992. Comparative accuracy of implant impression procedures. Int J Periodontics Restorative Dent 12(2): 112-21.
- Assif, D., Marshak, B. and Nissan, J. 1994. A modified impression technique for implant-supported restoration. J Prosthet Dent 71(6): 589-91.
- Assif, D., Nissan, J., Varsano, I. and Singer, A. 1999. Accuracy of implant impression splinted techniques: effect of splinting material. Int J Oral Maxillofac Implants 14(6): 885-8.
- Barrett, M. G., de Rijk, W. G. and Burgess, J. O. 1993. The accuracy of six impression techniques for osseointegrated implant. J Prosthodont 2(75-82).
- Barzilay, I. and Myers, M. L. 1987. The dual-arch impression. Quintessence Int 18(4): 293-5.
- Bergendal, B. and Palmqvist, S. 1995. Laser-welded titanium frameworks for fixed prostheses supported by osseointegrated implants: A two-year multicenter study report. Int J Oral Maxillofac Implants 10(199-206).
- Binon, P. P. 1995. Evaluation of machining accuracy and consistency of selected implants, standard abutments and laboratory analogs. Int J Prosthodont 8(162-178).
- Binon, P. P. 2000. Implants and components: Entering the new millennium. Int J Oral Maxillofac Implants 15(76-94).
- Block, M. S., Kent, J. N. and Guerra, L. R. 1997. Hybrid denture. Implants in Dentistry: Essentials of endosseous implants for maxillofacial reconstruction: 112-121.

- Boulton, J. L., Gage, J. P., Vincent, J. P. and Basford, K. E. 1996. A laboratory study of dimensional changes for three elastomeric impression materials using custom and stock trays. Aust Dent J 41(398-404).
- Branemark, P. I. 1983. Osseointegration and its experimental background. J Prosthet Dent 50(399-410).
- Breeding, L. C. and Dixon, D. L. 2000. Accuracy of casts generated from dual-arch impressions. J Prosthet Dent 84(4): 403-7.
- Bridger, D. V. and Nicholls, J. I. 1981. Distortion of ceramometal fixed partial dentures during the firing cycle. J Prosthet Dent 45(507-514).
- Burawi, G., Houston, F., Byrne, D. and Claffey, N. 1997. A comparison of the dimensional accuracy of the splinted and unsplinted impression techniques for the Bone-Lock implant system. J Prosthet Dent 77(1): 68-75.
- Burke, F. J. and Crisp, R. J. 2001. A practice-based assessment of the handling of a fast-setting polyvinyl siloxane impression material used with the dual-arch tray technique. Quintessence Int 32(10): 805-10.
- Burns, J., Palmer, R., Howe, L. and Wilson, R. 2003. Accuracy of open tray implant impressions: an in vitro comparison of stock versus custom trays. J Prosthet Dent 89(3): 250-5.
- Burton, J. F., Hood, J. A. and Plunkett, D. J. 1989. The effect of disposable and custom made impression tray on the accuracy of impressions. J Dent 17(121-123).
- Carr, A. B. 1991. Comparison of impression techniques for a five-implant mandibular model. Int J Oral Maxillofac Implants 6(4): 448-55.

- Carr, A. B. and Stewart, R. B. 1993. Full-arch implant framework casting accuracy: preliminary in vitro observation for in vivo testing. J Prosthodont 2(1): 2-8.
- Carr, A. B., Gerard, D. A. and Larsen, P. E. 1996. The response of bone in primates around unloaded dental implants supporting prostheses with different levels of fit. J Prosthet Dent 76(5): 500-9.
- Carr, A. B. and Master, J. 1996. The accuracy of implant verification casts compared with casts produced from a rigid transfer coping technique. J Prosthodont 5(4): 248-52.
- Carr, A. B. and Toth, B. 1996. Fit discrimination of implant frameworks by experienced clinicians (abstr). J Dent Res 75(183).
- Cehreli, M. C. and Akca, K. 2006. Impression techniques and misfit-induced strains on implant-supported superstructures: an in vitro study. Int J Periodontics Restorative Dent 26(4): 379-85.
- Ceyhan, J. A., Johnson, G. H. and Lepe, X. 2003. The effect of tray selection, viscosity of impression material, and sequence of pour on the accuracy of dies made from dual-arch impressions. J Prosthet Dent 90(2): 143-9.
- Ceyhan, J. A., Johnson, G. H., Lepe, X. and Phillips, K. M. 2003. A clinical study comparing the three-dimensional accuracy of a working die generated from two dual-arch trays and a complete-arch custom tray. J Prosthet Dent 90(3): 228-34.
- Chee, W., Felton, D. A., Johnson, P. F. and Sullivan, D. Y. 1999. Cemented versus screw-retained implant prostheses: which is better? Int J Oral Maxillofac Implants 14(1): 137-41.

- Cheshire, P. D. and Hobkirk, J. A. 1996. An in vivo quantitative analysis of the fit of Nobel Biocare implant superstructures. J Oral Rehabil 23(11): 782-9.
- Chiche, G. J. and Pinault, A. 1991. Considerations for fabrication of implant-supported posterior restorations. Int J Prosthodont 4(1): 37-44.
- Clelland, N. L. and van Putten, M. C. 1997. Comparison of strains produced in a bone simulant between conventional cast and resin-luted implant frameworks. Int J Oral Maxillofac Implants 12(6): 793-9.
- Cox, J. R., Brandt, R. L. and Hushes, H. J. 2002. A clinical pilot study of the dimensional accuracy of double-arch and complete-arch impression. J Prosthet Dent 87(5):10-5.
- Craig, R. G. 1997. Restorative Dental Materials: 438-439.
- Daoudi, M. F., Setchell, D. J. and Searson, L. J. 2001. A laboratory investigation of the accuracy of two impression techniques for single-tooth implants. Int J Prosthodont 14(2): 152-8.
- De La Cruz, J. E., Funkenbusch, P. D., Ercoli, C., Moss, M. E., Graser, G. N. and Tallents, R. H. 2002. Verification jig for implant-supported prostheses: A comparison of standard impressions with verification jigs made of different materials. J Prosthet Dent 88(3): 329-36.
- De Marco, T. J. and Paine, S. 1974. Mandibular dimensional change. J Prosthet Dent 31(4):482-485.
- Duyck, J. and Naert, I. 2002. influence of prosthesis fit and the effect of a luting system on the prosthetic connection preload: An in vivostudy. Int J Prosthodont 2002(3):389-396.

- Eames, W. B., Sieweke, J. C., Wallace, S. W. and Rogers, L. B. 1979. Elastomeric impression material: effect of bulk on accuracy. J Prosthet Dent 41(304-7).
- Eisenmann, E., Mokabberi, A., Walter, M. H. and Freesmeyer, W. B. 2004. Improving the fit of implant-supported superstructures using the spark erosion technique. Int J Oral Maxillofac Implants 19(6): 810-8.
- Emtiaz, S. and Goldstein, G. 1997. Effect of Die Spacers on Precementation Space of Complete-Coverage Restorations. Int J Prosthodont 10(131-135).
- Fairhurst, C. W., Furman, T. C., Schallhorn, R. V., Kirkpatrick, E. L. and Ryge, G. 1956. Elastic properties of rubber base impression materials. J Prosthet Dent 6(534-542).
- Fehling, A. W., Hesby, R. A. and Pelleu, G. B. J. 1986. Dimensional stability of autopolymerizing acrylic resin impression trays. J Prosthet Dent 55(592-597).
- Fischman, B. M. 1976. The influence of fixed splints on mandibular flexure. J Prosthet Dent 35(643-647).
- The glossary of prosthodontic terms. 2005. J Prosthet Dent 94(1): 10-92.
- Goldfogel, M., Harvey, W. L. and Winter, D. 1985. Dimensional change of acrylic resin tray materials. J Prosthet Dent 54(
- Goll, G. E. 1991. Production of accurately fitting full-arch implant frameworks: Part I-- Clinical procedures. J Prosthet Dent 66(3): 377-84.
- Goodkind, R. J. and Heringlake, C. B. 1973. Mandibular flexure in opening and closing movements. J Prosthet Dent 30(134-138).

- Gordon, G. E., Johnson, G. H. and Drennon, D. G. 1990. The effect of tray selection on the accuracy of elastomeric impression materials. J Prosthet Dent 63(12):5.
- Guichet, D. L., Caputo, A. A., Choi, H. and Sorensen, J. A. 2000. Passivity of fit and marginal opening in screw- or cement-retained implant fixed partial denture designs. Int J Oral Maxillofac Implants 15(2): 239-46.
- Hebel, K. S. and Gajjar, R. C. 1997. Cement-retained versus screw-retained implant restorations: achieving optimal occlusion and esthetics in implant dentistry. J Prosthet Dent 77(1): 28-35.
- Heckmann, S. M., Karl, M., Wichmann, M. G., Winter, W., Graef, F. and Taylor, T. D. 2004. Cement fixation and screw retention: parameters of passive fit. An in vitro study of three-unit implant-supported fixed partial dentures. Clin Oral Implants Res 15(4): 466-73.
- Henry, P. J. 1987. An alternative method for the production of accurate casts and occlusal records in osseointegrated implant rehabilitation. J Prosthet Dent 58(6): 694-7.
- Herbst, D., Nel, J. C., Driessen, C. H. and Becker, P. J. 2000. Evaluation of impression accuracy for osseointegrated implant supported superstructures. J Prosthet Dent 83(5): 555-61.
- Hobo, S., Ichida, E. and Garcia, L. T. 1989. Osseointegration and occlusal rehabilitation: 176-177.
- Hsu, C. C., Millstein, P. L. and Stein, R. S. 1993. A comparative analysis of the accuracy of implant transfer techniques. J Prosthet Dent 69(6): 588-93.

- Humphries, R. M., Yaman, P. and Bloem, T. J. 1990. The accuracy of implant master casts constructed from transfer impressions. Int J Oral Maxillofac Implants 5(4): 331-6.
- Inturregui, J. A., Aquilino, S. A., Ryther, J. S. and Lund, P. S. 1993. Evaluation of three impression techniques for osseointegrated oral implants. J Prosthet Dent 69(5): 503-9.
- Jansen, V. K., Conrads, G. and Richter, E. J. 1997. Microbial leakage and marginal fit of the implant abutment interface. Int J Oral Maxillofac Implants 12(5): 527-540.
- Jemt, T. 1995. Three-dimensional distortion of gold alloy castings and welded titanium frameworks: measurement of precision of fit between completed implant prostheses and the master cast in routine situation. J Oral Rehabil 22(5): 557-564.
- Jemt, T. and Lie, A. 1995. Accuracy of implant-supported prostheses in the edentulous jaw: analysis of precision of fit between cast gold-alloy frameworks and master casts by means of a three-dimensional photogrammetric technique. Clin Oral Implants Res 6(3): 172-80.
- Jemt, T. 1996. In vivo measurements of precision of fit involving implant-supported prostheses in the edentulous jaw. Int J Oral Maxillofac Implants 11(2): 151-8.
- Jemt, T. and Book, K. 1996. Prosthesis misfit and marginal bone loss in edentulous implant patients. Int J Oral Maxillofac Implants 11(5): 620-5.
- Jemt, T., Rubenstein, J. E., Carlsson, L. and Lang, B. R. 1996. Measuring fit at the implant prosthodontic interface. J Prosthet Dent 75(3): 314-324.

- Jemt, T. and Lekholm, U. 1998. Measurements of bone and frame-work deformations induced by misfit of implant superstructures. A pilot study in rabbits. Clin Oral Implants Res 9(4): 272-80.
- Johnson, G. H. and Craig, R. G. 1985. Accuracy of four types of rubber impression materials compared with time of pour and a repeat pour of models. J Prosthet Dent 53(484-90).
- Johnson, G. H. and Craig, R. G. 1986. Accuracy of addition silicones as a function of technique. J Prosthet Dent 55(197-203).
- Kallus, T. and Bessing, C. 1994. Loose gold screws frequently occur in full-arch fixed prostheses supported by osseointegrated implants after 5 years. Int J Oral Maxillofac Implants 9(2): 169-78.
- Kaplowitz, G. J. 1996. Trouble-shooting dual arch impressions. J Am Dent Assoc 127(2): 234-40.
- Kaplowitz, G. J. 1997. Trouble-shooting dual arch impressions II. J Am Dent Assoc 128(9): 1277-81.
- Karl, M., Winter, W., Taylor, T. D. and Heckmann, S. M. 2004. In vitro study on passive fit in implant-supported 5-unit fixed partial dentures. Int J Oral Maxillofac Implants 19(1): 30-7.
- Karl, M., Taylor, T. D., Wichmann, M. G. and Heckmann, S. M. 2006. In vivo stress behavior in cemented and screw-retained five-unit implant FPDs. J Prosthodont 15(1): 20-4.

- Keith, S. E., Miller, B. H., Woody, R. D. and Higginbottom, F. L. 1999. Marginal discrepancy of screw-retained and cemented metal-ceramic crowns on implants abutments. Int J Oral Maxillofac Implants 14(3): 369-78.
- Keller, W., Bragger, U. and Mombelli, A. 1998. Peri-implant microflora of implants with cemented and screw retained suprastructures. Clin Oral Implants Res 9(4): 209-17.
- Kim, S., Nicholls, J. I., Han, C. H. and Lee, K. W. 2006. Displacement of implant components from impressions to definitive casts. Int J Oral Maxillofac Implants 21(5): 747-55.
- Kohavi, D. 1993. Complications in the tissue integrated prostheses components: clinical and mechanical evaluation. J Oral Rehabil 20(4): 413-22.
- Kunavisarut, C., Lang, L. A., Stoner, B. R. and Felton, D. A. 2002. Finite element analysis on dental implant-supported prostheses without passive fit. J Prosthodont 11(1): 30-40.
- Larson, T. D., Nielsen, M. A. and Brackett, W. W. 2002. The accuracy of dual-arch impressions: a pilot study. J Prosthet Dent 87(6): 625-7.
- Lekholm, U., Van Steenberghe, D., Herrmann, I. and al., e. 1994. Osseointegrated implants in the treatment of partially edentulous jaws: A prospective 5-year multicenter study. Int J Oral Maxillofac Implants 9(6): 627-635.
- Lemons, J. and Natiella, J. 1986. Biomaterial, biocompatibility and peri-implant considerations Dent Clin North Am 30(4).
- Libby, G., Arcuri, M. R., LaVelle, W. E. and al., e. 1997. Longevity of fixed partial dentures. J Prosthet Dent 78(1): 127-131.

- Lindstrom, H. and Preiskel, H. 2001. The implant-supported telescopic prosthesis: a biomechanical analysis. Int J Oral Maxillofac Implants 16(1): 34-42.
- Linehan, A. D. and Windeler, A. S. 1994. Passive fit of implant-retained prosthetic superstructures improved by electric discharge machining. J Prosthodont 3(88-95).
- Linke, B., Nicholls, J. and Faucher, R. 1985. Distortion analysis of stone casts made from impression materials. J Prosthet Dent 54(794-802).
- Liou, A. D., Nicholls, J. I., Yuodelis, R. A. and Brudvik, J. S. 1993. Accuracy of replacing three tapered transfer impression copings in two elastomeric impression materials. Int J Prosthodont 6(4): 377-83.
- Loos, L. G. 1986. A fixed prosthodontic technique for mandibular osseointegrated titanium implants. J Prosthet Dent 55(2): 232-42.
- Lorenzoni, M., Pertl, C., Penkner, K., Polansky, R., Sedaj, B. and Wegscheider, W. A. 2000. Comparison of the transfer precision of three different impression materials in combination with transfer caps for the Frialit-2 system. J Oral Rehabil 27(7): 629-38.
- Michalakis, K. X., Hirayama, H. and Garefis, P. D. 2003. Cement-retained versus screw-retained implant restorations: a critical review. Int J Oral Maxillofac Implants 18(5): 719-28.
- Millington, N. D. and Leung, T. 1992. Stress on an implant superstructure in relation to its accuracy of fit. J Dent Res 71(529).

- Millington, N. D. and Leung, T. 1995. Inaccurate fit of implant superstructures. Part 1: Stresses generated on the superstructure relative to the size of fit discrepancy. Int J Prosthodont 8(6): 511-6.
- Millstein, P., Maya, A. and Segura, C. 1998. Determining the accuracy of stock and custom tray impression/casts. J Oral Rehabil 25(6):45-8.
- Misch, C. E. 1993. Principles for cement retained fixed implant prosthodontics. Contemporary implant dentistry.
- Misch, C. E. 2005. Dental implant Prosthetics.
- Mojon, P., Oberholzer, J. P., Meyer, J. M. and Belser, U. C. 1990. Polymerization shrinkage of index and pattern acrylic resins. J Prosthet Dent 64(6):684-688.
- Moon, P. C., Eshleman, J. R., Douglas, H. B. and Garrett, S. G. 1978. Comparison of accuracy of soldering indices for fixed prostheses. J Prosthet Dent 40(3):5-8.
- Mulcahy, C., Sherriff, M., Walter, J. D. and Fenlon, M. R. 2000. Measurement of misfit at the implant-prosthesis interface: an experimental method using a coordinate measuring machine. Int J Oral Maxillofac Implants 15(1): 111-8.
- Naconecy, M. M., Teixeira, E. R., Shinkai, R. S., Frasca, L. C. and Cervieri, A. 2004. Evaluation of the accuracy of 3 transfer techniques for implant-supported prostheses with multiple abutments. Int J Oral Maxillofac Implants 19(2): 192-8.
- Naert, I., Quirynen, M., Van Steenberghe, D. and darius, P. 1992a. A six-year prosthodontics study of 509 consecutively inserted implants for the treatment of partial edentulism. J Prosthet Dent 67(2):236-245.

- Naert, I., Quirynen, M., Van Steenberghe, D. and Darius, P. 1992b. A study of 589 consecutive implants supporting complete fixed prostheses. Part II: Prosthetic aspects. J Prosthet Dent 68(949-956).
- Ness, E. M., Nicholls, J. I., Rubenstein, J. E. and Smith, D. E. 1992. Accuracy of the acrylic resin pattern for the implant-retained prosthesis. Int J Prosthodont 5(6): 542-9.
- Nicholls, J. I. 1977. The measurement of distortion: Theoretical considerations. J Prosthet Dent 37(587-596).
- Nicholls, J. I. 1978. The measurement of distortion: Mathematical considerations. J Prosthet Dent 39(339-343).
- Nicholls, J. I. 1980. The measurement of distortion: Concluding remarks. J Prosthet Dent 43(218-223).
- Nissan, J., Gross, M., Shifman, A. and Assif, D. 2001. Stress levels for well-fitting implant superstructures as a function of tightening force levels, tightening sequence, and different operators. J Prosthet Dent 86(1): 20-3.
- O'Brien, W. J. 1997a. Dental Materials and Their Selection.: 100-101.
- O'Brien, W. J. 1997b. Dental Materials and Their Selection.: 147-150.
- Pagniano, R. P., Scheid, R. C., Clowson, R. L., Daagefoerde, R. O. and Zardiackas, L. D. 1982. Linear dimensional change of acrylic resins used in fabrication of custom trays. J Prosthet Dent 47(279-283).
- Parel, S. M. 1989. Modified casting techniques for osseointegrated fixed prosthesis fabrication: A preliminary report. Int J Oral Maxillofac Implants 4(33-40).

- Parker, M. H., Cameron, S. M., Hughbanks, J. C. and Reid, D. E. 1997. Comparison of occlusal contacts in maximum intercuspation for two impression techniques. J Prosthet Dent 78(3): 255-9.
- Patrick, J. H. 1987. An alternative method for the production of accurate casts and occlusal records in osseointegrated implant rehabilitation. J Prosthet Dent 58(6): 694-697.
- Phillips, K. M., Nicholls, J. I., Ma, T. and Rubenstein, J. 1994. The accuracy of three implant impression techniques: A three dimensional analysis. Int J Oral Maxillofac Implants 9(5):33-540.
- Phillips, R. W. 1991. Skinner's Science of Dental Materials.: 86-87.
- Pietrabissa, R., Gionso, L., Quaglini, V., Di Martino, E. and Simion, M. 2000. An in vitro study on compensation of mismatch of screw versus cement-retained implant supported fixed prostheses. Clin Oral Implants Res 11(5): 448-57.
- Preston, J. D. and Berger, R. 1977. Some laboratory variables affecting ceramo-metal alloys. Dent Clin North Am 21(7):717-728.
- Quirynen, M., Marechal, M., Busscher, H. J. and al., e. 1990. The influence of surface energy and surface roughness on early plaque formayion: an in vivo study in man. J Clin Periodontol 17(1):138-144.
- Quirynen, M., Naert, I., Van Steenberghe, D., De Keyser, C. and Callens, A. 1992. Periodontal aspects of osseointegrated fixtures supporting a partial bridge. An up-to-6-years retrospective study. J Clin Periodontol 19(1):118-126.

- Quirynen, M. and Van Steenberghe, D. 1993. Bacterial colonization of the internal part of two-stage implants. Clin Oral Implants Res 4(158-161).
- Quirynen, M., Bollen, C. M. L., Eyssen, H. and al., e. 1994. Microbial penetration along the implant components of the Branemark system: an in vitro study. Clin Oral Implants Res 5(239-244).
- Randi, A. P., Hsu, A. T., Verga, A. and Kim, J. J. 2001. Dimensional accuracy and retentive strength of a retrievable cement-retained implant-supported prosthesis. Int J Oral Maxillofac Implants 16(4): 547-56.
- Riedy, S. J., Lang, B. R. and Lang, B. E. 1997. Fit of implant frameworks fabricated by different techniques. J Prosthet Dent 78(6): 596-604.
- Rieger, M. R., Mayberry, M. and Brose, M. O. 1990. Finite element analysis of six endosseous implants. J Prosthet Dent 63(671-676).
- Romero, G. G., Engelmeier, R., Powers, J. M. and Canterbury, A. A. 2000. Accuracy of three corrective techniques for implant bar fabrication. J Prosthet Dent 84(6): 602-7.
- Rubenstein, J. E. 1995. Stereo laser-welded titanium implant frameworks: clinical and laboratory procedures with a summary of 1-year clinical trials. J Prosthet Dent 74(3): 284-93.
- Rueda, L. J., Sy-Munoz, J. T., Naylor, W. P., Goodacre, C. J. and Swartz, M. L. 1996. The effect of using custom or stock trays on the accuracy of gypsum casts. Int J Prosthodont 9(367-73).
- Schiffleger, B. D., Ziebert, G. J., Dhuro, V. B. and al., e. 1985. Comparison of accuracy of multiunit one piece castings. J Prosthet Dent 54(770-776).

- Schmitt, J. K., Adrian, E. D., Gardner, F. M. and Gaston, M. L. 1994. A comparison of impression techniques for the CeraOne abutment. J Prosthodont 3(3): 145-8.
- Schmitt, S. M. and Chance, D. A. 1995. Fabrication of titanium implant-retained restorations with nontraditional machining techniques. Int J Prosthodont 8(4): 332-6.
- Schneider, R. L. and Wee, A. G. 1996. Fabricating low-fusing metal casts for more accurate implant prosthodontics. J Prosthodont 5(4): 301-3.
- Shillingburg, H. T., Hobo, S., Whitsett, L. D., R, J. and Brackett, S. E. 1997. Fundamental of Fixed Prosthodontics.: 226-227.
- Skalak, R. 1983. Biomechanical considerations in osseointegrated prostheses. J Prosthet Dent 49(6): 843-8.
- Smedberg, J. I., Nilner, K., Rangert, B., Svensson, S. A. and Glantz, S. A. 1996. On the influence of superstructure connection on implant preload: a methodological and clinical study. Clin Oral Implants Res 7(1): 55-63.
- Sorensen, J. A., Avera, S. P. and Tomas, C. 1991. Comparison of interface fidelity of implant systems. J Dent Res 70(34).
- Spector, M. R., Donovan, T. E. and Nicholls, J. I. 1990. An evaluation of impression techniques for osseointegrated implants. J Prosthet Dent 63(4): 444-7.
- Sydiskis, R. J. and Gerhardt, D. E. 1993. Cytotoxicity of impression materials. J Prosthet Dent 69(4): 431-435.

- Tan, K. B., Rubenstein, J. E., Nicholls, J. I. and Youdelis, R. A. 1993. Three-dimensional analysis of the casting accuracy of one-piece, osseointegration implant-retained prosthesis. Int J Prosthodont 6(346-363).
- Taylor, D. T., Agar, J. R. and Vogiatzi, T. 2000. Implant prosthodontics: Current perspective and future directions. Int J Oral Maxillofac Implants 15(66-75).
- Tjan, A. H. L., Castelnuovo, J. and Shiotsu, G. 1997. Marginal fidelity of crowns fabricated from six proprietary provisional material. J Prosthet Dent 77(482-485).
- Uludamar, A. and Leung, T. 1996. Inaccurate fit of implant superstructures. Part II: Efficacy of the Pre-disc system for the corection of errors. Int J Prosthodont 9(16-20).
- Valderhaug, J. and Floystrand, F. 1984. Dimensional stability of elastomeric impression materials in custom-made and stock trays. J Prosthet Dent 52(514-517).
- Van Roekel, N. B. 1992. Electric discharge machining in dentistry. Int J Prosthodont 5(114-121).
- Vigolo, P., Majzoub, Z. and Cordioli, G. 2000. In vitro comparison of master cast accuracy for single-tooth implant replacement. J Prosthet Dent 83(5): 562-6.
- Vigolo, P., Majzoub, Z. and Cordioli, G. 2003. Evaluation of the accuracy of three techniques used for multiple implant abutment impressions. J Prosthet Dent 89(2): 186-92.
- Vigolo, P., Fonzi, F., Majzoub, Z. and Cordioli, G. 2005. Master cast accuracy in single-tooth implant replacement cases: an in vitro comparison. A technical note. Int J Oral Maxillofac Implants 20(3): 455-60.

- Vigolo, P., Fonzi, F., Majzoub, Z. and Cordioli, G. 2006. An in vitro evaluation of titanium, zirconia, and alumina procera abutments with hexagonal connection. Int J Oral Maxillofac Implants 21(4): 575-80.
- Walton, J. N., Gardner, F. M. and Agar, J. R. 1986. A survey of crown and fixed partial denture: length of service and reasons for replacement. J Prosthet Dent 56(416-421).
- Waskewitz, C. A., Ostrowski, J. S. and Parks, V. J. 1994. Photoelastic analysis of stress distribution transmitted from a fixed prosthesis attached to osseointegrated implant. Int J Oral Maxillofac Implants 9(405-411).
- Wassell, R. W. and Ibbetson, R. J. 1991. The accuracy of polyvinyl siloxane impressions made with standard and reinforced stock trays. J Prosthet Dent 65(748-57).
- Wee, A. G., Schneider, R. L., Aquilino, S. A., Huff, T. L., Lindquist, T. J. and Williamson, D. L. 1998. Evaluation of the accuracy of solid implant casts. J Prosthodont 7(3): 161-9.
- Wee, A. G., Aquilino, S. A. and Schneider, R. L. 1999. Strategies to achieve fit in implant prosthodontics: a review of the literature. Int J Prosthodont 12(2): 167-78.
- Willis, L. M. and Nicholls, J. I. 1980. Distortion in dental soldering as affected by gap distance. J Prosthet Dent 43(272-278).
- Wilson, E. G. and Werrin, S. R. 1983. Double arch impression for simplified restorative dentistry. J Prosthet Dent 49(198-202).
- Wise, M. 2001. Fit of implant-supported fixed prostheses fabricated on master casts made from a dental stone and a dental plaster. J Prosthet Dent 86(5): 532-8.

Yanase, R. T. 1994. How do you test a cast framework fit for full-arch fixed implant-supported prosthesis? Int J Oral Maxillofac Implants 9(469-474).

Zarb, G. A. and Smith, A. 1990. The longitudinal clinical effectiveness of osseointegrated dental implants: The Toronto study. Part III: Problems and complications encountered. J Prosthet Dent 64(185-194).

Zervas, P. J., Papazoglou, E., Beck, F. M. and Carr, A. B. 1999. Distortion of three-unit implant frameworks during casting, soldering, and simulated porcelain firings. J Prosthodont 8(3): 171-9.

วงศ์ไทย, ภ. 2539. การออกแบบฟันปลอมบางส่วนถอดได้แบบโครงโลหะ.

วงศ์ไทย, ภ. 2542. "การสบฟันในงานทันตกรรมประดิษฐ์". ชมรมทันตกรรมรากเทียมแห่งประเทศไทย.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย กรเทพ สุขยุค เกิดที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2524 สัญชาติไทย เชื้อชาติไทย จบการศึกษาระดับปริญญาตรี ทันตแพทยศาสตร์ บัณฑิต พ.ศ. 2548 จากคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปฏิบัติงาน ในตำแหน่งทันตแพทย์ประจำคลินิกเอกซน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ระหว่าง พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย