บทที่ 6

อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการนำโลหะเก่ามาเวียนใช้ซ้ำและอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่ากับโลหะใหม่ที่มีต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ โดยในเบื้องต้นได้วิเคราะห์ผลการวัดค่ากลสมบัติ 4 อย่างเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานตามข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา และเปรียบเทียบกับค่ากลสมบัติของกลุ่มควบคุมที่เป็นโลหะใหม่ล้วน เพื่อศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงของกลสมบัติในภาพรวมเมื่อได้รับผลกระทบจากปัจจัยทั้งสอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ในรายละเอียดถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยรวมทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้งสอง ซึ่งจะได้ความชัดเจนมากขึ้นในการอธิบายถึงผลของการนำโลหะเก่ามาเวียนใช้ซ้ำที่มีต่อกลสมบัติของโลหะผสมโคบอลต์โครเมียม

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัยพบว่า เฉพาะกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่าร้อยละ 25 กับโลหะใหม่ร้อยละ 75 โดยที่โลหะเก่าผ่านการเวียนใช้ซ้ำ 1 ครั้งเท่านั้นที่มีกลสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา ในขณะที่กลุ่มอื่นๆมีกลสมบัติอย่างน้อย 1 อย่างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม พบว่าเป็นเพียงกลุ่มตัวอย่างเดียวเช่นกันที่มีกลสมบัติแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 อาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่าร้อยละ 25 กับโลหะใหม่ร้อยละ 75 โดยที่โลหะเก่าผ่านการเวียนใช้ซ้ำ 1 ครั้งเท่านั้นที่มีกลสมบัติไม่ต่างจากโลหะใหม่หรือไม่มีผลให้กลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ด้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งน่าจะเหมาะสมสำหรับใช้ทำโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้

ผลดังกล่าวมีความขัดแย้งกับผลจากการศึกษาของ Hesby et al. (1980) ซึ่งพบว่าการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำ 4 ครั้งโดยไม่ผสมโลหะใหม่นั้นไม่มีผลต่อความทนแรงดึง ระยะของการยืดตัว และความแข็งผิวร็อคเวลล์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 4 กลุ่มด้วยสถิติ Student's T-test การศึกษานี้ได้ค่าความทนแรงดึงของตัวอย่างต่ำกว่ามาตรฐานตามข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกาถึงเกือบ

ครั้งหนึ่ง ซึ่ง Hesby et al. (1980) แสดงความเห็นว่าอาจเป็นผลจากขนาดที่แตกต่างกันมากระหว่างแกนค้างรูเทกับชิ้นตัวอย่าง ทำให้มีความเค้นสะสมบริเวณแกนของชิ้นตัวอย่างระหว่างที่โลหะเย็นตัว โดยมั่นใจว่ามิใช่ผลจากการหลอมโลหะซ้ำ และกลสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มตัวอย่างที่มีจำนวนครั้งในการเวียนใช้โลหะแตกต่างกันนั้นอาจเกี่ยวข้องกับรูพรุนหรือฟองอากาศในชิ้นตัวอย่าง การศึกษานี้มีข้อควรพิจารณาหลายประการซึ่งน่าจะมีผลต่อผลการศึกษาที่ได้ เช่นการขาดข้อกำหนดที่เป็นเกณฑ์ในการคัดตัวอย่างออก (exclusion criteria) การเปรียบเทียบผลระหว่างกลุ่มตัวอย่าง 4 กลุ่มด้วยสถิติ Student's T-test ซึ่งจะต้องเปรียบเทียบและทดสอบสมมติฐานถึง 6 ครั้ง แต่ละครั้งกำหนดระดับความมีนัยสำคัญเป็น 0.05 ทำให้โอกาสที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนชนิดที่ 1 ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนในลักษณะที่ปฏิเสธสมมติฐานศูนย์ในขณะที่สมมติฐานศูนย์นั้นถูกต้องรวมทั้งสิ้น 0.30 ระดับความเชื่อมั่นในการทดสอบจึงเหลืออยู่เพียงร้อยละ 70 จากร้อยละ 95 ที่ตั้งไว้ หากทดสอบความแตกต่างด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกแบบทางเดียวตามด้วยการทดสอบเปรียบเทียบภายหลัง (Post-hoc contrast) จะมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ผลการวิจัยยังมีความขัดแย้งกับผลการศึกษาโดย Nelson et al. ในปี 1986 ซึ่งพบว่าสามารถเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำกี่ครั้งก็ได้หากผสมโลหะใหม่ในอัตราส่วนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานในคลินิก กลสมบัติ และโครงสร้างจุลภาคของโลหะที่เหวี่ยงได้ ผลการศึกษาของ Nelson et al. (1986) มิได้แสดงค่าเป็นตัวเลขแต่แสดงผลในรูปของแผนภูมิเส้นซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัว ซึ่งน่าจะเป็นผลจากจำนวนตัวอย่างมีน้อยเกินไปเพียงแค่ 4 ตัวอย่างต่อกลุ่ม ความเบี่ยงเบนของข้อมูลทำให้ค่าเฉลี่ยของกลสมบัติส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนดที่ 14 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา ถึงแม้ว่าตัวอย่างบางชิ้นในกลุ่มมีกลสมบัติต่ำกว่าเกณฑ์ก็ตาม นอกจากนี้การสรุปผลมิได้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ อาศัยเพียงการประเมินค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากตัวอย่างแต่ละรุ่นเปรียบเทียบกันแล้วไม่พบแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงกลสมบัติที่เป็นรูปแบบแน่นอนเท่านั้น ทั้งๆที่ผลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในทางที่มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง บทสรุปดังกล่าวจึงมีความชัดเจนน้อยมาก และแตกต่างจากการวิจัยครั้งนี้ซึ่งพบว่าการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำมีผลอย่างมากต่อความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัวของโลหะที่เหวี่ยงได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลต่อความเครียดและความแข็งผิวนั้นมีน้อยกว่าและยังไม่แน่ชัด

ในส่วนของการวิเคราะห์อิทธิพลจากอัตราส่วนผสมโลหะเก่ากับโลหะใหม่ และจำนวนครั้งในการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำที่มีต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้นั้น พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่าง

ปัจจัยทั้งสองมีผลต่อความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัว ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ถึงผลจากแต่ละปัจจัยที่แต่ละระดับของอีกปัจจัยหนึ่ง พบว่าอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณโลหะใหม่มากและจำนวนครั้งในการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำน้อยครั้ง จะให้ความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัวของโลหะดีกว่าอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณโลหะใหม่น้อยและจำนวนครั้งในการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำมากครั้งอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราการลดลงของค่าความทนแรงดึงในแต่ละครั้งที่เวียนใช้โลหะเก่าซ้ำเมื่อเปรียบเทียบในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมโลหะเก่ากับโลหะใหม่เท่ากัน มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 9.32-29.51 ส่วนอัตราการลดลงของค่าระยะของการยืดตัว ซึ่งพบเฉพาะในกลุ่มตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่าร้อยละ 25 กับโลหะใหม่ร้อยละ 75 มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 33.43-58.05 สำหรับอิทธิพลของปัจจัยทั้งสองที่มีต่อความเครียดและความแข็งผิวนั้นไม่ชัดเจนเท่ากับที่มีต่อความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัว ถึงแม้จะพบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มตัวอย่างก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเครียดและความแข็งผิวกับอัตราส่วนผสมโลหะเก่ากับโลหะใหม่และจำนวนครั้งในการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำได้

ในปีค.ศ.1965 Harcourt ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหลอมโลหะซ้ำพบว่าโลหะที่ผ่านการหลอมซ้ำหลายครั้งจะควบคุมอุณหภูมิในการหลอมได้ยากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลที่ศึกษาในปีค.ศ. 1962 (Harcourt) ที่พบว่าจำนวนครั้งในการเหวี่ยงโลหะเก่าซ้ำเป็นสัดส่วนในทางตรงกันข้ามกับคุณสมบัติ มีหลายการศึกษาในระยะหลังเกี่ยวกับการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำที่ได้พยายามอธิบายถึงสาเหตุที่ทำให้การนำโลหะเก่าที่ผ่านการเวียนใช้ซ้ำมาเป็นส่วนผสมร่วมกับโลหะใหม่แล้วทำให้กลสมบัติด้อยลง Altay et al. (1990/1991) ได้เสนอแนวคิดว่าการผสมโลหะเก่าทำให้มีสิ่งปนเปื้อนเข้าไปผสมในโลหะที่จะหลอมและเหวี่ยง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อผสมโลหะเก่าในปริมาณมากจะยิ่งมีสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ภายในโลหะเก่ามากขึ้น ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการแทรกตัวของออกไซด์ สิ่งปนเปื้อน และเศษวัสดุแปลกปลอมในโลหะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจสังเกตุไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ก็ส่งผลให้โลหะหักได้ในกระบวนการสุดท้ายของผลเสียที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

ส่วนการหลอมโลหะเก่าซ้ำมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโลหะ ซึ่งผลจะมากขึ้นตามจำนวนครั้งในการหลอมซ้ำ จากตารางที่ 32 ซึ่งเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของธาตุโลหะบางตัวที่เป็นส่วนผสมในโลหะผสมทางทันตกรรม ธาตุโลหะแต่ละชนิดมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นแตกต่างกัน โดยในกลุ่มโครงโลหะผสมซึ่งได้แก่ โครเมียม โคบอลต์ และโมลิบดีนัมเกิดเร็วกว่ากลุ่มโลหะมีค่าได้แก่ ทอง เงิน และ พลาตินัม

ประกอบกับการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ (William, 1992) การได้รับความร้อนถึงระดับที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคหลายครั้ง จึงอาจทำให้มีการสูญเสียธาตุโลหะบางตัวจากสภาวะออกซิเดชั่นหรือจากการระเหย (vaporization) โดยเหตุที่ปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบภายในโลหะผสมทั้งที่เป็นองค์ประกอบหลักเช่น โคบอลต์ โครเมียม และที่เป็นองค์ประกอบเสริมเช่น โมลิบดีนัม คาร์บอน ล้วนแต่มีผลต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ (Asgar, Technow and Jacobson, 1980) การหลอมโลหะซ้ำจึงมีโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลสมบัติของโลหะจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบในการเวียนใช้โลหะซ้ำแต่ละครั้งและในแต่ละอัตราส่วนผสมโลหะเก่ากับโลหะใหม่ ถึงแม้ว่าการผสมโลหะใหม่อาจมีส่วนช่วยชดเชยธาตุโลหะบางตัวที่ขาดหายไป แต่ก็มิได้ช่วยให้กลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ดีขึ้นแต่อย่างใด ดังผลที่ได้ในการวิจัยครั้งนี้ การหลอมโลหะในครั้งแรกจึงนับว่ามีความสำคัญที่สุด เพราะมีผลต่อกลสมบัติของโลหะที่หลอมในครั้งต่อไป

Time (in h) for oxidation to a depth of 0.1 mm at $0.7\,T_M$ in air.

Gold	Infinite
Silver	Very long
Tin	Very long
Platinum	1.8×10^5
Chromium	1600
Nickel	600
Copper	25
Iron	24
Cobalt	7
Titanium	<6
Molybdenum	Very short

ตารางที่ 32 อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของธาตุโลหะในทางทันตกรรม

(ที่มา William, D. F. Materials science and technology: A comprehensive treatment. vol.14: Medical and dental materials.,1992 p.448)

นอกจากปัญหาดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในโลหะเมื่อผ่านการเวียนใช้ซ้ำยังส่งผลต่อกลสมบัติได้โดยทางอ้อม จากการที่โลหะที่เหวี่ยงได้ยากขึ้นเนื่องจากการไหลลดลง (metal fluidity) ทำให้เกิดการแยกตัวของโลหะ (metal disconnection) และปรากฏเป็นฟอง

อากาศหรือรูพรุนภายในโลหะหลังจากแข็งตัว ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในการศึกษาของ Hesby et al. (1980) และ Nelson (1982) Lewis (1977a,b,c,d, 1978) ศึกษาพบว่ามีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรูพรุนภายในชิ้นโลหะเหวี่ยง ได้แก่ รูปร่างของตัวอย่างซึ่งเป็นตัวกำหนดทิศทางในการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลว (solidification) (1977a), ขนาดของเบ้าหล่อโลหะ, อุณหภูมิของเบ้าหล่อโลหะ (1977b), อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมโลหะ, วิธีการหลอมโลหะ (1977c), ชนิดของวัสดุหล่อเบ้าที่เลือกใช้ (1977d), และปริมาณของธาตุโลหะแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบในโลหะผสม (1978) ปริมาณและคุณลักษณะของธาตุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานและองค์ประกอบเสริม มีอิทธิพลต่อปริมาณ การกระจาย และลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะ โดยเกี่ยวข้องกับการเกิดและการโตของเดนไดรต์ (dendrite growth) ซึ่งมิติของเดนไดรต์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับรูปแบบของรูพรุนในโลหะอีกต่อหนึ่ง Lewis (1978) เสนอแนวความคิดว่าผลจากธาตุโลหะที่มีต่อรูปแบบของการเกิดรูพรุนนั้นมีความแตกต่างกันตามความร้อนแฝง (latent heat) ของธาตุแต่ละตัวซึ่งมีค่าเฉพาะ, การมีส่วนร่วมในการเกิดสภาวะเย็นตัวยิ่งยวด (super cooling) ของโลหะ, ผลที่ธาตุโลหะมีต่อช่วงของเหลว-ของแข็งของโลหะ (liquidus-solidus intervals) และความสามารถในการละลายตัวของธาตุโลหะ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและคุณลักษณะของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในโลหะผสมกับการเกิดรูพรุนในชิ้นโลหะเหวี่ยง ซึ่งอาจใช้แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุโลหะในโลหะผสมเมื่อเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำ ที่เป็นสาเหตุให้กลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ด้อยลงจากการเกิดฟองอากาศหรือรูพรุนภายในเนื้อโลหะได้

ถึงแม้ว่าในการวิจัยครั้งนี้จะพบปัญหาเหวี่ยงโลหะได้ยากขึ้นเมื่อเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำมากครั้งขึ้น แต่เมื่อพิจารณาภาพถ่ายรังสีของชิ้นตัวอย่างพบว่ามีเพียง 1 ตัวอย่างจากทั้งหมด 78 ตัวอย่างที่สังเกตุเห็นฟองอากาศภายในได้อย่างชัดเจน ซึ่งได้คัดออกก่อนนำไปทดสอบกลสมบัติ ปัญหากลสมบัติด้อยลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่ใช้โลหะเก่าในอัตราส่วนมากและผ่านการเวียนใช้โลหะเก่าหลายครั้ง จึงน่าจะเกี่ยวข้องกับสาเหตุอื่นนอกเหนือจากสาเหตุของฟองอากาศหรือรูพรุน ซึ่งเมื่ออ้างอิงตามรายงานการศึกษาต่างๆที่กล่าวมาเบื้องต้น ประเด็นสำคัญน่าจะอยู่ที่การสูญเสียหรือความเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของธาตุโลหะบางชนิดในโลหะขณะที่หลอมซ้ำนั้นส่งผลโดยตรงต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาถึงโครงสร้างทางจุลภาคและการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุโลหะเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถอธิบายได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นทั้งในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัว รวมถึงผลที่เกิดขึ้นกับความเครียดและความแข็งผิวของโลหะที่เหวี่ยงได้

กลสมบัติที่ด้อยลงของโลหะที่เหวี่ยงได้เมื่อนำโลหะเก่ามาเวียนใช้ซ้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความทนแรงดึงและระยะของการยืดตัว ซึ่งผลจากการวิจัยครั้งนี้พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณโลหะเก่าและจำนวนครั้งในการเวียนใช้ที่มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้โครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้ขาดกลสมบัติที่ครบถ้วนสมบูรณ์สำหรับการทำหน้าที่ขององค์ประกอบต่างๆของโครงโลหะ ความทนแรงดึงที่ลดลงทำให้สูญเสียความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานต่อแรงบดเคี้ยวที่มากระทำต่อฟันปลอมโดยตรง และความต้านทานต่อการหักที่เกิดจากความเค้นสะสมภายในโครงโลหะ ขณะที่ระยะของการยืดตัวที่ลดลงทำให้เกิดปัญหาของไดเร็ครีเทนเนอร์ในส่วนของการยึดอยู่และความยืดหยุ่นที่เหมาะสมกับขนาดความคอดของซี่ฟันหลัก รวมถึงภยันตรายต่อฟันหลักซึ่งอาจได้รับแรงกระทำมากเกินไปในขณะถอดใส่ฟันปลอม ดังนั้นการเวียนใช้โลหะเก่าซ้ำจึงมีผลต่อกลสมบัติของโลหะที่เหวี่ยงได้ โดยมีขอบเขตจำกัดอยู่เพียงแค่อัตราส่วนผสมระหว่างโลหะเก่าร้อยละ 25 กับโลหะใหม่ร้อยละ 75 โดยที่โลหะเก่าผ่านการเวียนใช้ซ้ำ 1 ครั้งเท่านั้น จึงจะไม่ทำให้เกิดผลเสียต่อกลสมบัติของโครงโลหะฟันปลอมบางส่วนถอดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย