

## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วัสดุพิมพ์ปาก (impression materials) เป็นวัสดุที่ใช้สำหรับบันทึกหรือลอกเลียนรายละเอียดรูปร่างและความสัมพันธ์ระหว่างฟันและเนื้อเยื่อในช่องปาก โดยที่บริเวณที่ทำการพิมพ์อาจเป็นเพียงฟันซี่เดียวหรือฟันทั้งหมดหรือเป็นสันเหงือกว่าง (edentulous ridge) ก็ได้ การพิมพ์ปากจะทำให้ได้แบบจำลองฟัน (dental model) ขึ้นมาจากการเทพลาสติกเดอร์หิน (dental stone) ลงไปบนรอยพิมพ์ที่ได้ หลังจากนั้นจึงแกะแบบจำลองฟันออกจากรอยพิมพ์เมื่อพลาสติกเดอร์หินแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว ซึ่งแบบจำลองฟันที่ได้จะสามารถนำมาใช้งานต่างๆ ในทางทันตกรรมได้ เช่น ทันตกรรมจัดฟัน (Orthodontics) ทันตกรรมบดเคี้ยว (Occlusions) และ ทันตกรรมประดิษฐ์ (Prosthodontics) เป็นต้น (Craig 1989)

การใช้วัสดุพิมพ์ปากในการลอกเลียนรายละเอียดต่างๆ ในช่องปากจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติความหนืด (viscosity) และการไหลแผ่ (flow) ของวัสดุพิมพ์ปากในขณะอยู่ในลักษณะของไหล (fluid stage) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการปรับรูปร่างตามที่ต้องการ และสามารถบอกลักษณะระยะเวลาในการทำงาน (working time) และระยะเวลาการแข็งตัว (setting time) ของวัสดุได้เนื่องจากความหนืดของวัสดุนั้นขึ้นกับเวลา นอกจากนี้ควรจะต้องทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเมื่ออัตราเร็วแรงเฉือน (shear rate) เปลี่ยนแปลงไป เพื่อที่จะสามารถใช้งานวัสดุแต่ละชนิดได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Combe และ Moser 1976)

### คุณสมบัติรีโวลยีของวัสดุ (Rheological properties)

รีโวลยีเป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับการไหลแผ่และการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) ของวัสดุภายใต้การกระทำของแรง (มณีส์ แซ่ด่าน 2538, Seymour 1971 และ Nae 1993) โดยที่เป็นการรวมถึงกลไกของของไหล (fluid mechanics), ความหนืด (viscosity), ความเป็นพลาสติก (plasticity) และความยืดหยุ่น (elasticity) วัสดุที่มักจะถูกนำมาศึกษาคุณสมบัตินี้มีหลายชนิดเช่น สารแขวนลอย, โพลีเมอร์ (polymers), วัสดุพวกวิสโคอีลาสติก (viscoelastic materials) เป็นต้น (มณีส์ แซ่ด่าน 2538 และ Seymour 1971) การศึกษา ลักษณะของการไหลแผ่ของวัสดุพิมพ์ปากซึ่งจัดเป็นสารจำพวกโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือ

1. ศึกษาความหนืดของส่วนเบสที่ไม่ได้ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไปตามอัตราเร็วแรงเฉือนหรือเป็นฟังก์ชันของอัตราเร็วแรงเฉือน
2. ศึกษาความหนืดในขณะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง (cross-link reaction) (Herfort 1977)

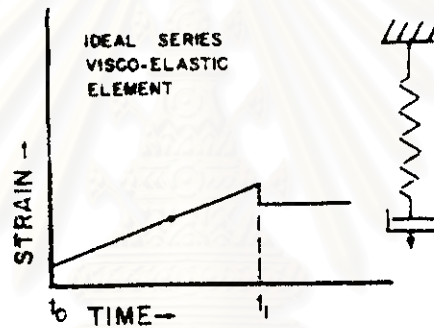
คุณสมบัติรีโอโลยีของวัสดุเป็นประโยชน์ในการบอกถึงวิธีในการใช้ (manipulate) วัสดุพิมพ์ปาก เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่มีผลต่อปริมาณของการไหลแผ่ของวัสดุพิมพ์ปาก และเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการช่วยเพิ่มความสำเร็จของการทำงานได้

### คุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของวัสดุ (Viscoelastic properties)

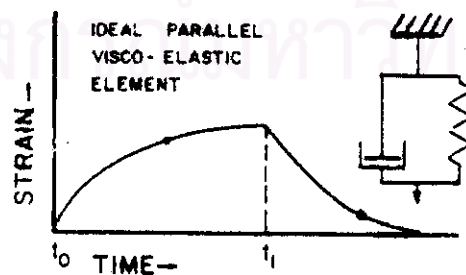
วิสโคอีลาสติกเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแล้วสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อปล่อยแรงกระทำออก แต่การคืนกลับสู่รูปร่างเดิมนั้นจะต้องอาศัยระยะเวลาช่วงหนึ่ง (ปริษา พหลเทพ 2538) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างนี้เกิดจากการเคลื่อนผ่าน (slippage) กันระหว่างสายโซ่โมเลกุลซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาและอัตราเร็วแรงเครียด (strain rate) นั่นคือถ้าใส่แรงเค้น (stress) เข้าไปอย่างช้าๆ สายโซ่โมเลกุลจะเคลื่อนผ่านกันได้อย่างง่ายดาย แต่ถ้าใส่อย่างเร็วสายโซ่โมเลกุลจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ทำให้โพลิเมอร์นั้นมีลักษณะที่เปราะเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อใส่แรงเข้าไปอย่างรวดเร็วโพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติเหมือนสารที่เป็นของแข็งเช่นโลหะหรือเซรามิก (ceramics) ส่วนที่อุณหภูมิสูงหรือเมื่อใส่แรงเข้าไปอย่างช้าๆ โพลิเมอร์จะมีคุณสมบัติเป็นของไหลหนืด (viscous liquid) ซึ่งคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกนี้จะช่วยอธิบายว่าโพลิเมอร์นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้การได้รับแรงได้อย่างไร และสามารถทำให้โพลิเมอร์นั้นมีรูปร่างที่ต้องการได้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกรณีต่างๆ ได้อย่างไร (Askeland 1994)

คุณสมบัติวิสโคอีลาสติกเป็นคุณสมบัติเฉพาะของโพลิเมอร์ซึ่งไม่พบในพวกเซรามิก โดยจะมีคุณสมบัติผสมระหว่างการยืดหยุ่น (elastic) และการไหลหนืด (viscous flow/viscosity) เข้าไว้ด้วยกัน ความหนืดหมายถึงธรรมชาติในการต้านต่อการไหลแผ่ของของไหล ซึ่งมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือน (shear stress) ทหารด้วยอัตราเร็วแรงเฉือน โดยที่ความหนืดมีหน่วยเป็นปัวส์ (poise) หรือดาเยิน์คูณวินาทีต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{dyne} \times \text{sec}/\text{cm}^2$ ) แต่หลายๆ ครั้งอาจพบว่าค่าความหนืดจะบอกเป็นเซ็นต์ปัวส์ (centipoise (cp)) โดย 1 ปัวส์ = 100 เซนต์ปัวส์ ส่วนการยืดหยุ่นเป็นความสามารถของวัสดุที่สามารถกลับคืนสู่ขนาดและรูปร่างเดิมเมื่อนำแรงกระทำที่ใส่เข้าไปออก (Jacob และ Kilduff 1997) ปฏิกิริยาที่แสดงคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกคือ การคืบ (creep), การคลายความเค้น (stress relaxation) และ การคืนกลับ (recovery) เป็นต้น (มนัส แซ่ตัน 2538) ตัวอย่างของวัสดุวิสโคอีลาสติกในทางทันตกรรมคือ ชีผึ้ง (wax), อมัลกัม (amalgam), เรซิน (dental resins), อะการ์ (agar), อัลจิเนต (alginate), วัสดุพิมพ์ปากที่มีลักษณะคล้ายยาง (rubber impression materials) และอื่นๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเมื่อได้รับแรงที่เหมาะสม (Craig 1989)

เมื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติระหว่างความยืดหยุ่นและการไหลหนืด จะใช้สปริง (spring) และกระบอกสูบ (dashpot) เป็นตัวแทนและสามารถต่อกันได้ 2 แบบคือแบบอนุกรม (series) เรียกแบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) (รูปที่ 1) และแบบขนาน (parallel) เรียกแบบจำลองเคลวิน (Kelvin model) (รูปที่ 2) ในแบบจำลองแมกซ์เวลล์เมื่อใส่แรงคงที่เข้าไปในสปริง สปริงจะถูกยืดออกทันทีแล้วลูกสูบจะเคลื่อนที่ตามอย่างช้าๆ เมื่อนำแรงออกจะมีการคืนกลับสภาพเดิมของสปริง คงเหลือแต่ส่วนที่เป็นลูกสูบซึ่งเป็นความเครียดหนืด (viscous strain) ส่วนในแบบจำลองเคลวินจะมีการเพิ่มความเครียดขึ้นในลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) ซึ่งเป็นผลจากส่วนหนืดหรือลูกสูบและเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าหนึ่งที่คงที่ซึ่งเป็นผลจากสปริง เมื่อเอาแรงกระทำออกแรงเครียดจะลดลงจนเหลือศูนย์โดยที่เป็นผลจากส่วนที่ทำหน้าที่เป็นสปริง (ปริชา พหลเทพ 2536 และ Craig 1989)

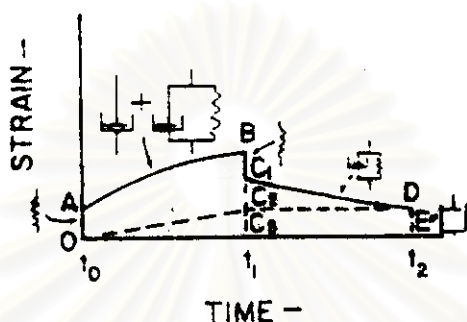


รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองแมกซ์เวลล์



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองเคลวิน

คุณสมบัติของโพลิเมอร์ที่แท้จริง เช่น อะคาร์, อีลิจเนต, วัสดุพิมพ์ปากที่มีลักษณะคล้ายยาง จะเป็นการรวมตัวกันของหลายๆ ส่วนประกอบ โดยอาจใช้แบบจำลองแม็กซเวลล์ร่วมกับ แบบจำลองเคลวินมาใช้ในการอธิบาย ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงกราฟระหว่างความเครียดและเวลาและแบบจำลองทางกลไกที่อธิบายลักษณะเฉพาะของวัสดุบางชนิดเช่นวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์เป็นต้น

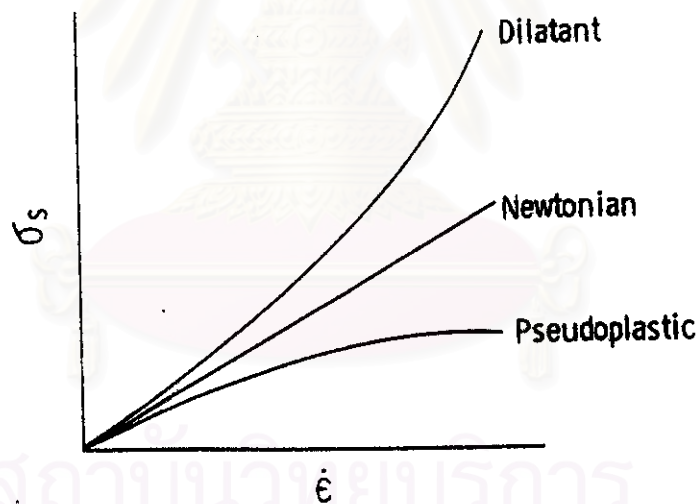
จากรูปที่ 3 เป็นตัวแทนของแบบจำลองทางกลไก (mechanical model) เมื่อใส่แรงไปที่เวลา  $t_0$  จะทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามเวลาที่ผ่านไปซึ่งเป็นผลจากส่วนหนืดในแบบจำลองแม็กซเวลล์และในแบบจำลองเคลวิน เมื่อเวลา  $t_1$  นำเอาแรงกระทำออกพบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากผลของสปริงในแบบจำลองแม็กซเวลล์ และมีการลดลงของความเครียดต่อไปอีกซึ่งเป็นผลจากสปริงและส่วนหนืดในแบบจำลองเคลวิน จนกระทั่งที่เวลา  $t_2$  จะไม่มีการลดลงของความเครียดอีกต่อไปซึ่งเป็นผลจากส่วนหนืดในแบบจำลองแม็กซเวลล์ (Craig 1989 และปริษา พทลเทพ 2536)

คุณสมบัติวิโคอีลาสติกของวัสดุพิมพ์ปากเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการทำงานในคลินิก เนื่องจากเป็นสิ่งที่ป้องกันถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ของวัสดุพิมพ์ปากอย่างทันทีทันใดในขณะที่ดึงออกจากปาก ในการดึงวัสดุออกจากปากไม่ควรใช้การโยกแต่ควรจะดึงออกอย่างรวดเร็วในทิศทางที่ขนานกับแนวแกนของฟัน เนื่องจากการดึงออกอย่างช้าๆ มักจะเป็นสาเหตุของการเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) และการฉีกขาดของวัสดุ (Anusavice 1996a)

### ความหนืด (Viscosity ( $\eta$ ))

ความหนืดเป็นแรงต้านต่อการไหลเฉื่อยของของไหลซึ่งเป็นแรงเสียดทาน (friction) ภายในตัวของของไหลเอง ปริมาณของความหนืดขึ้นอยู่กับแรงต้านทานภายใน (internal resistance) ของของไหลนั้น การวัดความหนืดมักใช้การวัดจากเวลาที่ของไหลปริมาณหนึ่ง ไหลผ่านท่อปลายเปิด (capillary opening) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ผ่านการตรวจสอบแล้ว ช่วงเวลาที่ได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับเวลาของวัสดุมาตรฐาน (standard material) เช่นน้ำ ซึ่งวัดที่อุณหภูมิเดียวกันและเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่เท่ากัน

ของไหลอาจแบ่งได้เป็นของไหลนิวโทเนียน (newtonian), สูโดพลาสติก (pseudoplastic) และไดลาแตนท์ (dilatant) ขึ้นอยู่กับความหนืดเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วแรงเฉือน ดังกราฟระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) และ อัตราเร็วแรงเฉือนต่อไปนี้ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 แสดงกราฟระหว่างอัตราเร็วแรงเฉือนและความเค้นเฉือนของของไหลสูโดพลาสติก, นิวโทเนียน และ ไดลาแตนท์

ความหนืดของของไหลสูโดพลาสติกจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเร็วแรงเฉือน ตัวอย่างของวัสดุที่มีคุณสมบัติสูโดพลาสติกคือ วัสดุพิมพ์ปากชนิดผสมครั้งเดียว (single-mix rubber impression material) เมื่อได้รับอัตราเร็วแรงเฉือนที่ต่ำในระหว่างผสมหรือใส่ลงในปากวัสดุจะมีความหนืดสูง แต่เมื่อใส่ในกระบอกฉีด (syringe) แล้วฉีดออกมาจะได้รับอัตราเร็วแรงเฉือนที่สูงความหนืดของวัสดุจะลดลง เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่าความบางเมื่อได้รับแรง

เฉือน (shear thinning) ประโยชน์ของการมีคุณสมบัติความบางเมื่อได้รับแรงเฉือนของวัสดุพิมพ์ปากคือ

1. มีความหนืดต่ำเมื่ออัตราเร็วแรงเฉือนสูงทำให้ฉีดวัสดุออกจากกระบอกฉีดได้ง่าย
2. สามารถต้านทานการไหลแฉได้เมื่ออัตราเร็วแรงเฉือนต่ำ ในกรณีฉีดวัสดุลงในร่องเหงือก เมื่อเกิดการหดกลับของเหงือก หรือมีน้ำเหลืองเหงือก (gingival fluid) ซึมขึ้นมาจะไม่สามารถไล่วัสดุพิมพ์ปากไปจากร่องเหงือกได้เนื่องจากวัสดุมีความหนืดที่สูง (Herfort และคณะ 1977) ส่วนความหนืดของของไหลโอสตาแดนท์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วแรงเฉือนเพิ่มขึ้นซึ่งไม่ค่อยพบในโพลีเมอร์ และเรียกคุณสมบัติเช่นนี้ว่าความหนาเมื่อได้รับแรงเฉือน (shear thickening)

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความหนืดคือเวลาและอุณหภูมิ ความหนืดของของไหลที่ไม่มีการแข็งตัว (nonsetting liquid) จะไม่ขึ้นกับเวลาแต่จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่ส่วนใหญ่วัสดุทางทันตกรรมจะแข็งตัวหลังจากผสมส่วนผสมต่างๆ เข้าด้วยกันซึ่งความหนืดจะเพิ่มขึ้นไปตามเวลา เช่น ซีเมนต์ (cements), วัสดุพิมพ์ปาก (Impression materials) ยกเว้นวัสดุพิมพ์ปากชนิดซึ่งคือออกไซด์ยูจีนอล (zinc oxide-eugenol) ซึ่งต้องการความชื้นในการทำให้วัสดุแข็งตัว (Craig 1989)

### ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ความยืดหยุ่นเป็นความสามารถในการคืนกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิมหลังจากได้รับแรงกระทำ ในวัสดุจำพวกพลาสติกที่ได้รับแรงกระทันหันทันใด (sudden impact) จะไม่เกิดความเครียดขึ้นทันที หรือจะไม่เกิดการคืนกลับอย่างสมบูรณ์เมื่อเอาแรงกระทำนั้นออก แต่จะมีการไหลแฉแบบมีความหนืด (viscous flow) อยู่ภายใน เนื่องจากแรงกระทำถูกดูดเข้าสู่พันธะโมเลกุล (molecular bonds) ซึ่งเป็นตัวดูดซับแรงสั่นสะเทือน (shock absorber) ซึ่งอาจแทนด้วยลูกสูบและสปริง ดังนั้นเมื่อนำแรงกระทำนั้นออกไปแล้วการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะไม่คืนกลับมาทั้งหมด (Jacob และ Kilduff 1997)

ความยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติที่ไม่พบในของแข็งน้ำหนักโมเลกุลต่ำ, ของเหลว และก๊าซ แต่สามารถพบได้ในโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubber-like elasticity) ที่เราเรียกว่าอีลาสโตเมอร์ (elastomer) ซึ่งสามารถยืดได้ทันทีที่มีแรงดึง โดยสามารถยืดได้ถึง 500-1000% โดยมีแรงต้านต่ำ มีความทนต่อแรงดึงสูงและไม่มีคุณสมบัติความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ต่ำ สามารถหดกลับได้รวดเร็วเมื่อปล่อยแรงดึง โพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะต้องเป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และอุณหภูมิที่ใช้งานปกติสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว (Glass Transition temperature (T<sub>g</sub>)) นอกจากนี้ต้องเป็นโพลีเมอร์ที่ไม่มีผลึก (amorphous polymer) และมีโครงสร้างเป็นตาข่ายบ้างพอสมควร (ปริชาพลเทพ 2536)

คุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุพิมพ์ปากจำพวกอีลาสโตเมอร์จะดีขึ้นตามเวลาที่ปล่อยไว้ให้วัสดุแข็งตัว (curing time) หรืออาจกล่าวได้ว่ายิ่งทิ้งรอยพิมพ์ไว้ในปากนานเท่าใดก็ตาม ก็จะได้รอยพิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงมากขึ้นเท่านั้น ระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุที่บริษัทผู้ผลิตแจ้งมาหรือค่าที่ได้จากการใช้เครื่องมือรีโอมิเตอร์ (rheometer) มักจะไม่นานเพียงพอที่วัสดุจะมีความยืดหยุ่นมากพอที่จะต้านต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรในขณะที่วัสดุออกจากปาก ตัวอย่างเช่นค่าของระยะเวลาการแข็งตัวที่ได้จากการใช้รีโอมิเตอร์จะน้อยกว่าเวลาที่ต้องการจริงของวัสดุในการมีความยืดหยุ่นที่เหมาะสมที่สามารถดึงวัสดุออกได้อยู่ประมาณ 1-2 นาที (Anusavice 1996b)

### เครื่องมือวัดทางรีโอลยี

เครื่องมือรีโอมิเตอร์ (Rheometer) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะแรงที่กระทำคือเครื่องมือวัดลักษณะเป็นเชิงเส้น (linear behavior) เช่นเครื่องมือวัดชนิดสั่น (oscillating) และเครื่องมือวัดลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear behavior) เช่น เครื่องมือวัดความหนืดแคปิลลารี (capillary viscometer) ( มนัส แซ่ตัน 2538) เครื่องมือวัดความหนืดในอุดมคติควรจะสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติรีโอลยีของวัสดุได้ในสถานการณ์ที่คล้ายคลึงกับการใช้งานในชีวิตจริง (Nae 1993)

เครื่องมือวัดความหนืดที่ใช้วัดวัสดุทางทันตกรรมควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (Combe และ Moser 1976)

1. สามารถวัดวัสดุที่มีความหนืดสูงได้
2. สามารถวัดความหนืดที่เปลี่ยนไปตามเวลาได้
3. สามารถวัดความหนืดในวัสดุปริมาณน้อยได้
4. สามารถเปลี่ยนอัตราเร็วแรงเฉือนซึ่งมีอิทธิพลต่อความหนืดได้
5. ควรใช้อุปกรณ์น้อยที่สุดไม่ยุ่งยากในการทำงาน

เครื่องมือวัดความหนืดที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานจะต้องสามารถใช้ได้กับวัสดุทุกชนิด, ค่าความหนืดที่สามารถวัดได้มีช่วงกว้าง, สามารถให้ค่าอัตราเร็วแรงเฉือนและความถี่ของการสั่น (oscillating) ที่หลากหลาย รวมทั้ง สามารถปรับอุณหภูมิได้ช่วงกว้างอีกด้วย Nae (1993) ได้ให้หลักในการพิจารณาการเลือกใช้เครื่องมือวัดความหนืดไว้ดังนี้

1. เป็นการวัดแบบสมบูรณ์ (absolute) หรือแบบสัมพันธ์ (relative)
2. หลักการพื้นฐานของเครื่องมือวัดความหนืดนั้นเป็นอย่างไร, เครื่องมือที่ใช้วัด (measuring device) คืออะไร
3. เป็นเครื่องมือที่มีลักษณะการวัด (mode) เป็นแบบใด แบบเดี่ยวหรือรวมหลายแบบไว้ในเครื่องมือชิ้นเดียวกัน

4. ค่าที่อ่านเที่ยงตรงเพียงใด
5. ใช้งานง่ายหรือไม่
6. สามารถปรับค่าใดได้บ้าง : อัตราเร็วแรงเฉือน, ความเค้นเฉือน, ความถี่, อุณหภูมิ
7. สามารถวัดอุณหภูมิและเวลาในการทดลองได้หรือไม่
8. มีลักษณะการเคลื่อนขึ้นและลงเพื่อวัดธิกโซโทรปี (thixotropy) หรือไม่
9. เป็นระบบที่ใช้กับคอมพิวเตอร์หรือไม่
10. การทดลองดำเนินไปด้วยคอมพิวเตอร์หรือเครื่องมือสำหรับควบคุม (control unit)
11. ใช้ปริมาตรของสารทดสอบเท่าใด
12. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature control unit) เป็นลักษณะติดตั้งอยู่ในเครื่อง (build-in unit) หรือแยกออกมาจากตัวเครื่อง (separate unit) และต้องการการติดตั้งเพิ่มเติมเป็นพิเศษหรือไม่
13. ระบบซอฟต์แวร์ใช้งานง่ายหรือไม่ สามารถคำนวณข้อมูลหรือแสดงผลออกมาเป็นกราฟได้หรือไม่
14. ระบบเชื่อมต่อกับเครื่องพิมพ์ได้อย่างไร
15. ต้องดูแลรักษาเครื่องมืออย่างไร บริษัทให้ความรับผิดชอบเท่าใด และใช้เวลาในการซ่อมแซมนานเท่าใด
16. ราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดที่จำเป็นต้องติดตั้งเพื่อให้สามารถใช้งานได้ยังมีประสิทธิภาพ

เครื่องมือวัดความหนืดที่จะนำมาใช้สำหรับกำหนดมาตรฐานของวัสดุต่างๆ จะต้องตรวจสอบความเที่ยงตรงด้วยของไหลสำหรับตั้งค่ามาตรฐาน (calibration fluid) อย่างน้อย 3 ชนิดซึ่งมีความหนืดอยู่ในช่วง 500 ถึง 1,000 ปีวส์ (Combe และ Moser 1978) ตัวอย่างของเครื่องมือวัดความหนืดมีหลายชนิด เช่น

#### เครื่องมือวัดความหนืดแคปิลารี (Capillary viscometer)

หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความหนืดชนิดนี้คือ ใช้ความดันเป็นตัวดันให้ของไหลไหลผ่านท่อปลายเปิดที่ทราบเส้นผ่าศูนย์กลางที่แน่นอน ของไหลที่มีความหนืดมากจะต้องใช้ความดันมาก เครื่องมือวัดความหนืดแคปิลารีนี้เป็นเครื่องมือวัดแบบไม่เป็นเส้นตรง เพราะจะมีการเปลี่ยนแปลงในระดับสายโซ่โมเลกุลในขณะที่มีการไหล (มนัส แซ่ตัน 2538) และความหนืดที่วัดได้จะสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านท่อปลายเปิดนี้ นอกจากนี้จะต้องมีการควบคุมมาตรฐานเครื่องมือด้วยของไหลมาตรฐาน (standard fluid) ที่ทราบความหนืดแน่นอนเสียก่อน เครื่องมือชนิดนี้สามารถวัดความหนืดได้เพียงจุดเดียว (one-point



measurement) จึงมักใช้กับของไหลนิวโทเนียนและสารละลายเจือจาง (dilute solution) (Nae 1993)

Wanis และคณะได้ทำการทดลองหาความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผันกลับไม่ได้ (irreversible hydrocolloid impression material) โดยใช้เทคนิคของการใช้ท่อแคปิลลารี (capillary techniques) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ถ้วยทรงกระบอกสำหรับใส่สารทดสอบ (specimen) มีท่อแคปิลลารียาว 40.27 มิลลิเมตรและมีตัววัดที่พอดีกับถ้วยกระบอก ติดเครื่องมือทั้งหมดนี้เข้ากับเครื่องทดสอบโดยใช้ความเร็วในการทดสอบ (crosshead speed) ต่างๆ กัน ซึ่งจะทำให้เกิดอัตราเร็วแรงเฉือนที่ต่างกันด้วย แรงที่ใช้ดันสารทดสอบผ่านท่อแคปิลลารีจะถูกวัดโดยโหลดเซลล์ที่ผ่านการควบคุมมาตรฐานแล้ว (calibrated load cell) (Wanis และคณะ 1993)

เมื่อวัสดุถูกดันผ่านท่อปลายเปิด แรงที่ใช้จะขึ้นกับความหนืด ซึ่ง

$$\eta = \tau / \gamma \dots\dots\dots(1)$$

สำหรับของไหลนิวโทเนียน ความเค้น ( $\tau$ ) จะเป็นฟังก์ชันในแนวเส้นตรง (linear function) ของความเครียด ( $\gamma$ ) และ  $\tau=0$  เมื่อ  $\gamma = 0$  ,  $\eta =$  ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity) แต่มีหลายวัสดุที่ไม่มีลักษณะของการเป็นวัสดุนิวโทเนียน (newtonian behavior) ซึ่ง  $\tau$  ไม่ได้เป็นฟังก์ชันในแนวเส้นตรงของ  $\gamma$  แต่เป็นสัดส่วนต่อ  $\gamma$  ที่เพิ่มขึ้นด้วยการยกกำลัง  $n$  เรียกความหนืดกรณีนี้ว่า  $\eta_a$  หรือความหนืดแอฟพาเรนท์ (apparent viscosity) และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\tau$  และ  $\gamma$  จะเป็นไปตามลักษณะของกฎเอมไพริคัลพาวเวอร์ (empirical power law)

$$\tau = K(\gamma)^n \dots\dots\dots(2)$$

แรงเค้นเฉือนที่ผนังท่อ (capillary wall) ( $\tau_w$ )

$$\tau_w = \Delta P / 2L \dots\dots\dots(3)$$

อัตราเร็วแรงเฉือนแอฟพาเรนท์ (apparent shear rate) ที่ผนังท่อ ( $\gamma_{w,a}$ )

$$\gamma_{w,a} = 4Q / \pi r^3 \dots\dots\dots(4)$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาความหนืดฟอลส์แอฟพาเรนท์ (false apparent viscosity) ( $\eta_{a,r}$ )

$$\eta_{a,r} = \tau_w / \gamma_{w,a} \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อใช้สมการกฎพาวเวอร์ (power law equation)

$$\tau_w = K(\gamma_{w,a})^n \dots\dots\dots(6)$$

ดังนั้น  $\log \tau_w = \log K + n \log \gamma_{w,a}$

สำหรับวัสดุนิวโทเนียน จากสมการ (3) และ (4)

$$\eta = \tau_w / \gamma_{w,a} = \frac{\pi \times \Delta P \times r^4}{8Q \times L} \dots\dots\dots(7)$$

ซึ่งเป็นรูปแบบของ Poiseuille's law

สำหรับของไหลที่ไม่มีลักษณะนิวโทเนียน จะสามารถเขียน Rabinowitsch correction ได้ดังนี้

$$\gamma_{w,t} = \frac{3n+1}{4n} \times \gamma_{w,a} = \frac{3n+1}{4n} \times \frac{4Q}{\pi r^3} \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ  $\gamma_{w,t}$  = อัตราเร็วแรงเฉือนที่แท้จริง (true shear rate) ที่บริเวณผนังท่อแคปิลารี  
 ดังนั้นความหนืดแอปพารนที่แท้จริง ( $\eta_{a,t}$ )

$$\eta_{a,t} = \tau_w / \gamma_{w,t} \dots\dots\dots(9)$$

เขียนกราฟ  $\log \tau_w$  กับ  $\log \gamma_{w,a}$  และหาความชัน n

- ถ้า n = 1 ของไหลนั้นมีคุณสมบัตินิวโทเนียน
- n < 1 ของไหลนั้นมีคุณสมบัติยูโดพลาสติก
- n > 1 ของไหลนั้นมีคุณสมบัติไดลาแตนท์

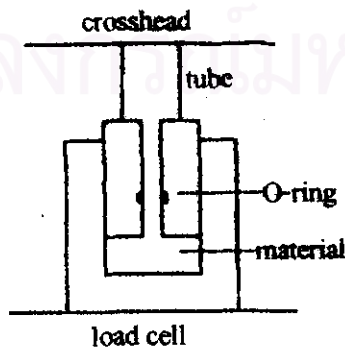
ข้อกำหนดสำหรับเครื่องมือวัดความหนืดแคปิลารีคือ

1. เคลื่อนโดยไม่มีความเร่ง (steady state flow)
2. ของไหลจะต้องไม่ถูกอัด (compress)
3. ต้องเกิดการไหลแฝงลักษณะลามินาร์ (laminar flow) ซึ่งตรงข้ามกับการไหลแฝงเคอริวเลนท์ (turbulent flow) โดยจะเกิดขึ้นได้เมื่อค่าเรย์โนลด์ (Reynolds number (Re)) มีค่าน้อยกว่า  $2 \times 10^3$

$$Re = \frac{d v \rho}{\eta}$$

- d = เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแคปิลารี
- v = ความเร็วของของไหลในท่อแคปิลารี
- $\rho$  = ความหนาแน่นของของไหล

4. ต้องมีการตรวจสอบสัดส่วนแอสเปค (aspect ratio) ของท่อแคปิลารี (L/d) ถ้าทางเข้าออกมีขนาดเล็กจะมีผลต่อแรงเค้นเฉือนที่วัดได้ ในทางปฏิบัติค่าของ L/d ไม่ควรน้อยกว่า 20



Indirect extrusion viscometer  
 (crosshead speed 0.002-1 in/min)

รูปที่ 5 แสดงโดยแกรมของเครื่องมือวัดความหนืดอินไดเร็กเอกซทรูชัน (Indirect extrusion viscometer) ซึ่งจัดเป็นเครื่องมือวัดความหนืดแคปิลารีชนิดหนึ่ง

ท่อเทฟลอน (Teflon vessel) เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 6.4 มม.

แกนเทฟลอน (Teflon piston) ยาว 15 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 6.35 มม. มีวงแหวน (O-ring) ที่บริเวณปลาย

ท่อแคปิลารีมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.75 มม.

#### การคำนวณ

คำนวณแรงเค้นเฉือนและอัตราเร็วแรงเฉือนจากสมการ (3) และ (4) ในหน่วย ดายน์ควินาที่ต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นเขียนกราฟ  $\log \tau_w$  กับ  $\log \dot{\gamma}_w$  แล้วจึงหาค่า  $n =$  ความชัน ขึ้นต่อไปของการคำนวณจะขึ้นกับค่า  $n$  ที่ได้ ถ้าค่า  $n$  ใกล้เคียงกับ 1 ของไหลจะมีคุณสมบัติเป็นสารนิวโทเนียน ให้เขียนกราฟ  $\tau_w$  กับ  $\dot{\gamma}_w$  โดยเริ่มที่จุด (0,0) ความชันของกราฟจะเป็นค่าความหนืดของวัสดุในหน่วยปัวส์ ถ้า  $n$  ไม่เท่ากับ 1 สามารถคำนวณความหนืดเทียม (false viscosity) ได้จากสมการที่ (5) และ กราฟระหว่าง  $\eta_{sp}$  กับ  $\dot{\gamma}_w$  จากค่า  $n$  และ  $a$  ที่หาได้จะสามารถใช้ Rabinowitsch correction ได้ และสามารถหาความหนืดที่แท้จริง (true apparent viscosity) ได้ (Combe และ Moser 1976)

#### เครื่องมือวัดความหนืดชนิดโรเตชัน (Rotational viscometer)

เครื่องมือวัดความหนืดชนิดนี้จะอาศัยหลักการพื้นฐานของการหมุน (rotate) สารตัวอย่างและวัดการตอบสนองของสารนั้นต่อความเค้นที่ใส่เข้าไปด้วยตัวเซ็นเซอร์ (sensor) ที่มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เครื่องมือวัดความหนืดชนิดโรเตชันนี้มีอยู่หลายชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านของอัตราเร็วแรงเฉือนที่มีช่วงระหว่าง  $10^{-4}$  1/วินาที ถึง  $10^4$  1/วินาที และความเค้นเฉือนมีค่าระหว่าง  $10^{-3}$  ปาสคาล (Pa) ถึง  $10^4$  ปาสคาล ซึ่งหมายความว่าเครื่องมือชนิดนี้สามารถวัดความหนืดที่อยู่ในช่วง  $10^{-7}$  ปาสคาลวินาที (Pa.s) ถึง  $10^8$  ปาสคาลวินาทีได้ การคำนวณหาค่าของความหนืดจะใช้วิธีหาอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนที่วัดได้ต่ออัตราเร็วแรงเฉือนที่ตั้งไว้ก่อนการทดลอง ตัวอย่างของเครื่องมือวัดความหนืดแบบโรเตชันอย่างง่าย ๆ คือเครื่องมือวัดความหนืดสตอมเมอร์ (Stommer viscometer) ซึ่งวัดแรงที่ใช้ในการหมุนพาย (paddle) ที่อยู่ในสารทดสอบ , เครื่องมือวัดความหนืดไอ ซี ไอ (ICI viscometer) ซึ่งวัดความหนืดที่อัตราเร็วแรงเฉือนสูง ๆ ประมาณ 10,000 1/วินาที และ เครื่องมือวัดความหนืดบรูคฟิลด์ (Brookfield viscometer) ซึ่งใช้วัดแรงที่ใช้ในการหมุนพายที่ ทราบจีโอเมทรี (geometry) ด้วยความเร็วที่กำหนด (Nae 1993)

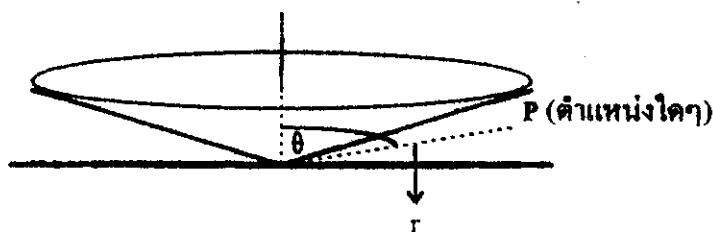
เครื่องมือวัดความหนืดโรเตชันเป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยทรงกระบอก 2 ชั้นรัศมี R1 และ R2 สูง h โดยมีช่องไหลอยู่ระหว่างทรงกระบอกทั้ง 2 นี้ โดยทั่วไปมักให้ทรงกระบอกภายในอยู่หนึ่งและทรงกระบอกภายนอกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega_0$  ของไหลจะเคลื่อนที่ภายใต้ความเค้นเฉือนและเกิดอัตราเร็วแรงเฉือนเท่ากับ  $d\epsilon/dt$  โดยของไหลจะมีการไหลผ่านในลักษณะลามินาร์ (มันส์ แชค่าน 2538)

Herfort และคณะในปี 1977 ได้ทำการทดลองวัดความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ (elastomeric impression material) โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดโรเตชัน เขาได้ทำการทดสอบเฉพาะส่วนเบสอย่างเดี่ยว โดยหาความหนืดที่ได้รับผลกระทบจากอัตราเร็วแรงเฉือน และทดสอบส่วนเบสผสมสารเชื่อมขวาง (cross-linking agent) โดยให้คงอัตราเร็วแรงเฉือนที่  $10 \text{ วินาที}^{-1}$  อุณหภูมิ  $25^\circ \text{C}$  และหาความหนืดที่เปลี่ยนไปตามเวลา เครื่องมือวัดความหนืดโรเตชันที่ Herfort ใช้มีทรงกระบอกด้านในเป็นตัวหมุน ตัวก้านที่ติดกับทรงกระบอกด้านนอกจะมีเครื่องบันทึกแรงบิด (torque recording monitor) สำหรับบันทึกค่าแรงบิด (torque) ที่เกิดขึ้นแล้วเปลี่ยนเป็นค่าดัชนีของความหนืด (index of viscosity) แทน

นอกจากเครื่องมือวัดความหนืดโรเตชันในลักษณะข้างต้นแล้วยังมีเครื่องมือวัดความหนืดโรเตชันที่ประกอบด้วยทรงกระบอกสำหรับใส่สารทดสอบและพายรูปร่างตัวที (T-bar spindle) ซึ่งเป็นตัวหมุนทำให้เกิดแรงขึ้นซึ่งบันทึกค่าแรงบิดเป็น  $\tau$  สามารถปรับความเร็วของการหมุนพายได้ ทำให้สามารถทดสอบได้ในหลายอัตราเร็วแรงเฉือน และนอกจากนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ทดสอบได้อีกด้วย (Kim และคณะ 1992, Koran และคณะ 1977)

#### เครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลต (Cone and plate rheometer)

เครื่องมือชนิดนี้ถูกออกแบบมาให้ใช้กับสารตัวอย่างปริมาณน้อยๆ คือประมาณ 0.2 มล. ถึง 5 มล. เท่านั้น และเนื่องจากใช้ปริมาณสารเพียงเล็กน้อย วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Nae 1993) วัสดุที่ต้องการศึกษาจะอยู่ระหว่างกรวยและแผ่นเรียบที่มีรัศมียาว  $R$  และยอดของกรวยวางอยู่บนแผ่นเรียบนั้น โดยมุมที่กรวยกระทำต่อแผ่นเรียบนั้นเป็นเพียงมุมเล็กๆ (มันส์ แซ่ตัน 2538) ซึ่งมีค่าน้อยมาก 0.1 ถึง 3 (Nae 1993) เมื่อหมุนกรวยด้วยความเร็ว  $\omega$  ของไหลจะมีการไหลแผ่แบบลามินาร์ ในขณะที่แผ่นเรียบไม่ได้เคลื่อนที่ ความเร็วเชิงมุมในบริเวณที่ติดกับแผ่นเรียบจะมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนบริเวณที่ติดกับกรวยจะมีค่าเท่ากับ  $\omega$  ของไหลในแต่ละจุดจะอยู่ภายใต้ความเค้นเฉือน  $\tau$  และอัตราเร็วแรงเฉือน  $d\epsilon/dt$  ที่ตำแหน่งใดๆ สามารถกำหนดได้ด้วย  $r$  และมุม  $\theta$  โดยที่  $r$  เป็นรัศมีที่ห่างจากจุดศูนย์กลาง และ  $\theta$  เป็นมุมระหว่างแกนของกรวย และเส้นที่ลากเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางกับจุดที่พิจารณา



รูปที่ 6 แสดงไดอะแกรมของเครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลต

ข้อจำกัดของเครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลตคือ การตั้งจุดยอดของกรวยบนแผ่นเรียบนั้นยากมาก และไม่เหมาะสมกับของไหลที่มีความหนืดต่ำมาก ๆ แต่มีข้อดีคือมีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง ทำการทดลองง่ายและใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อย (มนัส แซ่ด่าน 2538)

จากการใช้เครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลตทดสอบความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผันกลับไม่ได้ (irreversible hydrocolloid impression materials) (Waris และคณะ 1993) มีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่โดยกำหนดอุณหภูมิของน้ำที่หล่ออยู่ภายนอก มีกรวยที่หมุนได้ (rotating cone) โดยติดอยู่กับเครื่องวัดแรงบิด (torque meter) ซึ่งจะบันทึกค่าของแรงบิดออกมาและสามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนืดได้ โดยที่ค่าคงที่ของโคน (cone constant) สามารถหาได้จากการเขียนกราฟเส้นตรงระหว่างแรงบิดกับน้ำหนักของของไหลมาตรฐาน 10 ชนิด และสมการสำหรับหาค่าของความหนืดมีดังต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\text{torque value}}{r \text{ min}^{-1}} \times \text{cone constant}$$

#### เครื่องมือวัดความหนืดเอกซทรูชัน (Extrusion rheometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้การฉีดวัสดุออกจากกระบอกฉีดโดยบรรจุวัสดุลงในกระบอกฉีดปริมาตร 2 มิลลิลิตร หลังจากนั้นฉีดกระบอกฉีดเข้ากับขวดแก้วปากแคบ เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดกระบอกฉีดให้อยู่ในแนวตั้ง นำขวดแก้วและกระบอกฉีดวางบนฐานของไหลดเซลล์แบบอัด (compression load cell) ของเครื่องทดสอบอินสตรอน (Instron testing machine) ในการทดสอบจะเริ่มกดกระบอกฉีดเมื่อเวลา 1 นาทีหลังจากเริ่มผสมวัสดุ และกดทุก ๆ 0.5 นาที จนค่าความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และทำการบันทึกแรงที่กดแต่ละครั้งไว้ การใช้วิธีนี้ในการวัดความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากได้รับการอ้างว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถวัดได้ในขณะที่วัสดุกำลังแข็งตัว (McCabe และ Bowman 1981)

Vermilyea และคณะ ในปี 1979 ได้ออกแบบเครื่องมือวัดความหนืดเอกซทรูชันขึ้นมา โดยการออกแบบของเขามุ่งให้เครื่องมือนี้สามารถใช้ทดสอบวัสดุที่มีปริมาณน้อยๆ ได้ สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความหนืดตามเวลา, สามารถกำหนดอัตราเร็วแรงเฉือนและควบคุมอุณหภูมิได้ และนอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือที่ไม่ยุ่งยากในการใช้ เครื่องมือที่เขาคิดขึ้นนี้ประกอบด้วยส่วนเปลือกภายนอกสำหรับใส่น้ำหล่อ (water jacket) สูง 9.5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 2.5 และ 0.63 เซนติเมตร ซึ่งจะมขนาดพอดีกับที่เก็บสารเสริม (reservoir housing) และท่อแคปิลารี มีแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้นประกอบส่วนเปลือกภายนอกสำหรับใส่น้ำหล่อไว้ ส่วนเคลือบภายนอกนี้ติดอยู่กับฐานกลวงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร และมีหน้าต่างเปิดที่ฐานเพื่อ

สามารถสังเกตการไหลออกของวัสดุในขณะที่ทดสอบได้ ตัวที่เก็บสารเสริมมีส่วนที่เป็นท่อยาว 4 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน 0.8 เซนติเมตร ด้านหนึ่งติดกับท่อแคปิลารีส่วนอีกด้านหนึ่งติดกับแท่งอัด (plunger) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.03 มิลลิเมตร โดยที่แท่งอัดถูกดัดแปลงมาจากหลอดฉีดยาสำหรับฉีดเข้าใต้ผิวหนัง (glass hypodermic syringe) ขนาด 0.5 ซีซี และท่อแคปิลารีชนิดใช้แล้วทิ้งจะใช้หลอดฉีดยาชนิดฉีดเข้าใต้ผิวหนังแบบปลายทู่ (blunt-end hypodermic syringe) ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน  $0.52 \pm 0.01$  มิลลิเมตร และยาว 55 มิลลิเมตร ซึ่งจะเปลี่ยนทุกครั้งที่มีการทดสอบครั้งใหม่

#### เครื่องมือวัดความหนืดรีซิโพรเคต (Reciprocating rheometer)

หลักการของเครื่องมือนี้คือใช้การเคลื่อนของแผ่นที่มีรู (perforated plate) ผ่านวัสดุพิมพ์ปากที่ผสมแล้ว ซึ่งจะสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการแข็งตัวของวัสดุ (MaCabe และ Bowman 1981) และให้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติการเป็นเจล (gelling properties) ของวัสดุได้ (Wilson 1966a) ลักษณะของเครื่องมือประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมติดกับกระปุกเกียร์ (gear box) ที่ขับเคลื่อนโดยวงล้อภายนอก (eccentric wheel) ซึ่งเชื่อมอย่างอนุกรมอยู่กับคาน การหมุนของมอเตอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่แบบรีซิโพรเคตและคานจะเคลื่อนที่ไปด้านหลังและถอยหลังด้วยความเร็วที่สามารถกำหนดได้ด้วยกระปุกเกียร์ ส่วนระยะทางการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดโดยวงล้อภายนอก (Wilson 1966b)

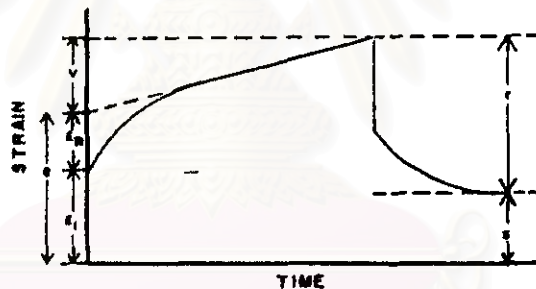
#### เครื่องมือวัดความหนืดออสซิลลาตอรี (Oscillatory rheometer)

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความหนืดที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นที่อยู่ด้านบนและด้านล่าง โดยที่แผ่นบนจะอยู่นิ่งกับที่ และสามารถควบคุมอุณหภูมิตามต้องการได้ด้วยน้ำที่ปล่อยให้ไหลผ่านเครื่องมือ ส่วนแผ่นล่างจะสั่นด้วยอัตราเร็ว 10 ครั้งต่อนาที หลักการสำหรับเครื่องมือชนิดนี้คือ เมื่อใส่วัสดุที่ผสมแล้วลงในเครื่องมือ หลังจากทีวัสดุมีความหนืดมากขึ้นจะเป็นตัวที่ลดการเคลื่อนที่ของแผ่นโลหะแผ่นล่าง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการบันทึกบนแผ่นบันทึกในลักษณะเส้นกราฟที่สั่นลง (Harcourt 1978) พบว่าความเครียดอาจค่อยๆ เพิ่มขึ้นในขณะที่ความถี่ของการสั่นคงที่ หรือ ความถี่ของการสั่นค่อยๆ เพิ่มขึ้นในขณะที่ความเครียดคงที่ก็ได้ ระบบการวัดความหนืดจะเป็นในลักษณะการสั่น (oscillating) มากกว่าการหมุน (rotating) แต่ในเครื่องมือบางชนิดอาจรวมทั้งการสั่นและการหมุนเข้าไว้ด้วยกันก็ได้ (Nae 1993)

### การทดสอบคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกโดยใช้การทดสอบความคืบ (creep test)

เป็นวิธีการที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการคืนกลับ (recovery) ของวัสดุ และเป็น การทดสอบที่ใช้เครื่องมือน้อยชิ้น โดยให้แรงกระทำต่อชิ้นทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ หลังจากนั้นนำแรงออกแล้ววัดความเครียดที่เปลี่ยนไปตามเวลา ได้มีผู้คิดแบบจำลองกลไก (mechanical model) สำหรับการคืบ (creep) ของโพลิเมอร์ที่ไม่มีผลึกซึ่งแบบจำลองนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. การตอบสนองแบบยืดหยุ่นอย่างทันทีทันใด (Instantaneous elastic response ( $E_i$ )) โดยไม่ขึ้นกับเวลา
2. การตอบสนองแบบยืดหยุ่นอย่างช้า (Retarded elastic response ( $E_r$ )) ซึ่งขึ้นอยู่กัเวลา
3. การไหลแม่หรือส่วนหนืด (viscous component ( $V$ )) ซึ่งเป็นฟังก์ชันแนวเส้นตรงกับเวลา



รูปที่ 7 แสดงกราฟการคืบ (creep curve)

ถ้าอัตราส่วนของความเครียดต่อความเค้นมีค่าคงที่ที่เวลาต่างๆ กัน แสดงว่าวัสดุนั้นมีคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกในแนวเส้นตรง (linear viscoelastic) และส่วนโค้งของการคืบ (creep curve) ทั้งหมดจะสามารถหาได้จากกราฟระหว่างการคืบและเวลา (creep compliance-time curve) เมื่อวัสดุมีการคืบต่ำ จะมีการไหลแม่แบบหนืด (viscous flow) ที่ต่ำ และเขาพบว่าเมื่อดึงวัสดุพิมพ์ปากชนิดโพลีเอเธอร์ออกจากปากแล้วเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โพลีเอเธอร์นั้นจะมีคุณสมบัติเป็นวัสดุอีลาสติกในอุดมคติ (ideal elastic material) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ไม่ขึ้นกับเวลา, ไม่มีการไหลแม่แบบหนืดร่วมกับมีการคืนกลับใกล้เคียง 100 % ดังนั้นเมื่อดึงออกจากปากโพลีเอเธอร์จะเป็นวัสดุที่ปลอดภัยจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้จะยิ่งดีขึ้นเมื่อทันตแพทย์เก็บวัสดุและใช้วัสดุอย่างถูกต้อง (Goldberg 1974)

## วัสดุพิมพ์ปาก

วัสดุพิมพ์ปากใช้สำหรับบันทึกหรือลอกเลียนรายละเอียดรูปร่างและความสัมพันธ์ของฟันและเนื้อเยื่อในช่องปาก ซึ่งพื้นที่ที่จะทำการพิมพ์นั้นอาจเป็นเพียงฟันซี่เดียวหรือทุกซี่ หรือเป็นสันเหงือกที่ไม่มีฟันเลยก็ได้ โดยปกติแล้ววัสดุพิมพ์ปากจะถูกนำเข้าไปในปากในขณะที่อยู่ในสภาพที่เป็นพลาสติก (plastic stage) แล้วจึงนำออกจากปากเมื่อแข็งตัวแล้ว (Craig 1989) ซึ่งปกติของปากจะมีส่วนคอด (undercut) ซึ่งจะมีผลต่อความเที่ยงตรง (accuracy) ของวัสดุ เนื่องจากความเที่ยงตรงจะขึ้นกับการคืนกลับของวัสดุเมื่อต้องดึงตัวออกจากส่วนคอดนั้น วัสดุพิมพ์ปากที่จัดอยู่ในจำพวกของแข็ง เช่นคอมปาวด์ (Impression compound), ซิงค์ออกไซด์ยูจินอล จะไม่สามารถดึงตัวผ่านส่วนคอดได้เลย ดังนั้นถ้ามีปริมาณของส่วนคอดมากวัสดุพิมพ์ปากพวกนี้จะไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ (Phillips 1991a) ดังนั้น วัสดุพิมพ์ปากที่ดีจึงควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (Craig 1989)

1. กลิ่น, รสดีและสีสวยงามน่าใช้
2. ไม่มีสารพิษและระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อ
3. มีอายุการเก็บ (shelf life) ที่นานพอ
4. ราคาไม่แพง
5. ใช้งาน และใช้อุปกรณ์ไม่มากนัก
6. มีลักษณะการแข็งตัว (setting characteristics) ที่เหมาะสมกับการใช้งานทางคลินิก
7. มีลักษณะเนื้อวัสดุ (consistency) และลักษณะพื้นผิว (texture) เป็นที่น่าพอใจ
8. มีความสามารถในการเปียกน้ำ (wettability) ต่อเนื้อเยื่อในช่องปากดี
9. มีคุณสมบัติของการยืดหยุ่นที่จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรหลังจากได้รับความเครียด
10. มีความแข็งแรงที่สูงเพียงพอที่จะสามารถต้านต่อการฉีกขาดเมื่อดึงออกจากปาก
11. มีเสถียรภาพทางมิติ (dimensional stability) ในอุณหภูมิและความชื้นของห้องทำงาน และห้องปฏิบัติการที่นานเพียงพอที่จะเทแบบจำลอง
12. สามารถเข้ากันได้ (compatibility) กับวัสดุเทแบบจำลอง
13. มีความเที่ยงตรงที่ดี
14. สามารถทำการกำจัดเข็บบนวัสดุพิมพ์ปากได้โดยไม่ทำให้สูญเสียความเที่ยงตรงแต่อย่างใด

## การแบ่งชนิดของวัสดุพิมพ์ปาก

การแบ่งชนิดของวัสดุพิมพ์ปากสามารถแบ่งได้หลายแบบ แบบหนึ่งคือแบ่งตามวิธีที่วัสดุนั้นแข็งตัว เช่น ปลาสเตอร์ (plaster of Paris) แข็งตัวด้วยปฏิกิริยาทางเคมี (chemical action) ส่วนคอมปาวด์แข็งตัวด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี จึงถูกเรียกว่าเป็นสารเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic substances) การแบ่งอีกแบบ



หนึ่งคือ แบ่งตามลักษณะของวัสดุที่สามารถติดตัวออกจากส่วนคอดในช่องปาก (elastic properties) ได้หรือไม่ ตัวอย่างของการแบ่งชนิดของวัสดุพิมพ์ปากได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

|  | <i>Rigid or Inelastic</i>     | <i>Elastic</i>  |
|--|-------------------------------|---|
| แข็งตัวโดยปฏิกิริยาทางเคมี<br>(ผันกลับไม่ได้)        | plaster<br>zinc oxide-eugenol | alginate hydrocolloid<br>nonaqueous elastomer<br>- polysulfide<br>polymers<br>- polyether<br>- silicone |
| แข็งตัวโดยการเปลี่ยนแปลง<br>อุณหภูมิ<br>(ผันกลับได้) | compound<br>wax               | agar hydrocolloid   |

ตารางที่ 1 แสดงการแบ่งชนิดของวัสดุพิมพ์ปากลักษณะของการแข็งตัว (Phillips 1991a)

#### **คอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปาก (Impression compound)**

คอมปาวด์มักจะถูกเรียกว่าพลาสติกสำหรับขึ้นรูป (modeling plastic) ซึ่งจะอ่อนนุ่มเมื่อโดนความร้อน และจะต้องกดผ่านลงไปบนเนื้อเยื่อก่อนที่คอมปาวด์จะแข็งตัว คอมปาวด์เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับพิมพ์สันเหงือกกว้างและในบางโอกาสก็ใช้สำหรับงานทันตกรรมหัตถการ (Operative dentistry) สำหรับพิมพ์ฟันเพียงซี่เดียวหรือใช้ในการยึดแมทริกซ์แบนด์ (matrix band) หรือเครื่องมือทางทันตกรรมหัตถการอื่นๆ (Anusavice 1996c)

คอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากมีหลายชนิดด้วยกัน เมื่อใช้คอมปาวด์สำหรับพิมพ์สันเหงือกกว้างโดยใส่ลงในถาดพิมพ์ปากหลังจากให้ความร้อนจนอ่อนนุ่มแล้ว จะเรียกคอมปาวด์ชนิดนี้ว่า คอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากที่แท้จริง (true impression compound) หรือคอมปาวด์ชนิดที่ 1 (type I compound) ตามข้อกำหนดของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา ส่วนชนิดอื่นๆ เช่นคอมปาวด์สำหรับทำถาดพิมพ์ปาก (tray compound) ซึ่งจัดเป็นคอมปาวด์ชนิดที่ 2 (type II compound) สำหรับใช้เป็นวัสดุทำถาดพิมพ์ปากและใช้ร่วมกับวัสดุพิมพ์ปากชนิดอื่น คอมปาวด์สำหรับทำถาดพิมพ์ปากนี้มีลักษณะที่หนืดกว่าคอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากเมื่ออ่อนตัว และมีความแข็งมากกว่าเมื่อแข็งตัว และเนื่องจากการลอกเลียนรายละเอียดเล็กๆ น้อยๆ ไม่ได้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับคอมปาวด์ชนิดทำถาดพิมพ์ปาก ดังนั้นคอมปาวด์ชนิดนี้จึงมีความแข็งกว่าและมีการไหลแผ่น้อยกว่าคอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากปกติ (Phillips 1991a)

ในปัจจุบันนี้การใช้คอมปาวด์สำหรับทำถาดพิมพ์ปากถูกแทนที่ด้วยการใช้อะคริลิกเรซิน (acrylic resin) สำหรับทำถาดพิมพ์ปากแทน และการใช้คอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากก็ลดลง โดยมีการใช้วัสดุพิมพ์ปากที่มีคุณสมบัติคล้ายยาง (Rubber impression material) แทน ซึ่งสามารถทำการขึ้นรูปด้วยไฟฟ้า (electroform) เพื่อทำตายโลหะ (metal die) ได้ แต่อย่างไรก็ตามคอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากยังคงมีประโยชน์ในการตรวจสอบหาส่วนคอดในการเตรียมแควิตี้ (cavity preparation) ได้ และใช้สำหรับพิมพ์ฟันที่ทำครอบ (full crown preparation) ในกรณีที่ต้องการให้ต้นเหงือกบริเวณคอฟันออกไป (Craig 1988)

โดยทั่วไปแล้วคอมปาวด์ประกอบด้วยส่วนผสมของซีเมนต์, เทอร์โมพลาสติกเรซิน (thermoplastic resin), ฟิลเลอร์ (filler), และสี (coloring agent) ซีเมนต์และเรซินในคอมปาวด์เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งจะรวมตัวเป็นส่วนเมทริกซ์ (matrix) แต่โครงสร้างส่วนนี้มีลักษณะที่เหลวมากเกินไปที่จะใช้งาน และมีความแข็งแรงที่ต่ำเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงต้องมีการเติมฟิลเลอร์ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความหนืดที่อุณหภูมิสูงกว่าช่องปาก และเพิ่มความแข็งตรงที่อุณหภูมิห้อง (Anusavice 1996c)

คอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากมีอุณหภูมิการรวมตัว (fusion temperature) ประมาณ  $43.5^{\circ}\text{C}$  หรือ  $110.3^{\circ}\text{F}$  ส่วนอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้วมีค่าประมาณ  $39^{\circ}\text{C}$  หรือ  $102^{\circ}\text{F}$  ความสำคัญของอุณหภูมิการรวมตัวคือเป็นตัวบ่งชี้ถึงการลดลงของความเป็นพลาสติก (plasticity) ในขณะที่คอมปาวด์เย็นตัวลง ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการรวมตัวนี้ พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) จะอยู่ในสถานะของเหลวทำให้คอมปาวด์มีความอ่อนนุ่มสามารถลอกเลียนรายละเอียดของเนื้อเยื่อในช่องปากได้ และเมื่อใส่ถาดพิมพ์ปากเข้าที่แล้วควรจับไว้หนึ่งๆ จนกว่าจะถึงอุณหภูมิการรวมตัวและดึงถาดพิมพ์ปากออกเมื่อเลยอุณหภูมินี้ไปแล้ว

การไหลแผ่ของคอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปากสามารถเป็นได้ทั้งประโยชน์หรืออาจเป็นสาเหตุของการผิดพลาด หลังจากที่ทำให้คอมปาวด์อ่อนนุ่มแล้วใส่เข้าไปในปาก ซึ่งในช่วงนี้การไหลแผ่เป็นสิ่งที่ต้องการมากเพื่อลอกเลียนรายละเอียดทั้งหมดของช่องปากหรือส่วนที่ต้องการอย่างถูกต้องแม่นยำ และไม่ควรมีการคลายตัว (relaxation) เกิดขึ้นหลังจากนี้ ความหนืดหรือการไหลแผ่ในช่วงดังกล่าวนี้ขึ้นกับอุณหภูมิและส่วนประกอบของคอมปาวด์ที่ใช้ เมื่อคอมปาวด์แข็งตัวการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างควรเป็นลักษณะมีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (completely elastic) เพื่อที่จะได้ดึงรอยพิมพ์ออกจากปากได้โดยไม่เกิดการบิดเบี้ยว (distort) หรือมีการไหลแผ่เกิดขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วสภาพเช่นนี้จะไม่สามารถเกิดกับวัสดุประเภทไม่มีความยืดหยุ่น (nonelastic material) ได้ (Phillips 1991a)

การไหลแผ่ที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ของคอมปาวด์ประเภทที่ 1 ตามข้อกำหนดที่ 13 ของทันตแพทย์สมาคมแห่งสหรัฐอเมริกา คือ 0% ที่อุณหภูมิช่องปาก ซึ่งเป็นที่ยอมรับว่าเป็น

ค่าที่ไม่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวเมื่อดึงออกจากปาก และค่าของการไหลแม่ที่อุณหภูมิ 45°C (113°F) ไม่ควรต่ำกว่า 85% (Phillips 1991a)

ตามข้อกำหนดที่ 13 ของ ANSI/ADA ของคอมปาวด์สำหรับขึ้นรูป (modeling compound) จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ มีเนื้อวัสดุที่เนียนเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และเมื่อผ่านเปลวไฟผิวหน้าจะต้องมีลักษณะเรียบมัน และเมื่อทดลองตัดด้วยมีดคมๆ ที่อุณหภูมิห้อง บริเวณขอบที่ถูกตัดจะต้องมีลักษณะที่แน่นและเรียบ (Phillips 1991a)

### พลาสติกสำหรับพิมพ์ปาก (Impression plaster)

ในปัจจุบันนี้พลาสติกสำหรับพิมพ์ปากไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีความแข็งตรงและแตกหักง่าย แต่อาจจะมีการใช้ในกรณีที่มีผู้ป่วยมีปริมาณน้ำลายจากต่อมน้ำลายเล็กๆ บริเวณเพดานปาก (accessory palatine gland) ออกมามาก โดยที่พลาสติกจะดูดซับเอาน้ำลายไว้ และจะทำให้ได้รอยพิมพ์ที่ปราศจากคำหนึหรือข้อบกพร่อง ความแข็งแรงอัด (compressive strength) ของ พลาสติกสำหรับพิมพ์ปากหลังจากแข็งตัวแล้ว 1 ชั่วโมง มีค่าเพียง 400 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ถึงแม้จะมีค่าความแข็งแรงอัดต่ำแต่ถ้าใช้งานอย่างถูกวิธีก็จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆขึ้น (Craig 1975)

พลาสติกสำหรับพิมพ์ปากเป็นวัสดุพิมพ์ปากที่มีความแข็งตรงสูง เมื่อผสมผงกับน้ำ จะได้สารที่มีลักษณะคล้ายแป้งเปียกที่สามารถไหลแม่ได้อย่างอิสระ (free-flowing paste) ซึ่งสามารถ ไหลแม่ไปตามเนื้อเยื่อในช่องปากได้ โดยไม่กดหรือทำให้เนื้อเยื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป หลังจากนั้นพลาสติกจะแข็งตัวและจะสามารถนำออกจากปากได้โดยต้องทำให้เกิดการแตกหักก่อนที่จะมีการบิดงอหรือบิดเบี้ยวเกิดขึ้น แต่คุณสมบัติแข็งตรงของพลาสติกก็ยังไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆ เมื่อใช้เป็นวัสดุพิมพ์ปากในกรณีที่ไม่มีฟันและไม่มีส่วนคอคดที่จะทำให้ดึงวัสดุพิมพ์ปากไม่ออก และเพื่อที่จะทำให้ประสบความสำเร็จในการใช้วัสดุชนิดนี้ควรจะต้องมีการลดระยะเวลาการแข็งตัว (setting time) และควบคุมการขยายตัวของวัสดุหลังจากแข็งตัว ซึ่งสามารถทำได้โดยเติมสารเคมีที่สามารถผสมกับส่วนผงหรือสามารถละลายในน้ำได้ โดยที่ระยะเวลาการแข็งตัวของพลาสติก สำหรับพิมพ์ปากจะถูกกำหนดโดยสารควบคุม (controlling agents) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิต (Craig 1989) ซึ่งจะมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปโดยจะช่วยเร่งการแข็งตัวของพลาสติกและช่วยควบคุมการขยายตัวให้มีน้อยลงด้วย (Landesman และ Reisbick 1982) ส่วนการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผงต่อส่วนน้ำก็สามารถทำให้ทันตแพทย์สามารถใช้งานได้อย่างสะดวก แต่จะมีผลกระทบต่อลักษณะของเนื้อและความแข็งแรงของวัสดุได้ (Craig 1989)

ในการเทแบบจำลองด้วยปูนปลาสเตอร์หรือพลาสติกก็ตาม จะมีการแทรกซึมของน้ำและเฮมิไฮเดรต (hemihydrate) ที่ถูกละลายเข้าไปในรูพรุนของพลาสติกแล้วเกิดการเชื่อมต่อน้ำเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะสามารถป้องกันได้โดยการทาสารแยก (separating medium) ก่อนการเทแบบจำลอง โดยสารแยกจะทำหน้าที่ปิดรูพรุนของพลาสติกและทำให้เทแบบจำลองออกได้ง่าย ตัวอย่างของสารแยกที่ใช้เช่น วานิช (varnish) และ น้ำสบู่ เป็นต้น (Craig และคณะ 1975 และ Craig 1989) สารแยกที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือสารละลายของสารประกอบอัลจีเนต (solutions of alginate compound) ซึ่งเป็นสารแยกที่มีลักษณะเป็นเพียงแผ่นฟิล์มบางๆ อยู่บนผิวของพลาสติกเท่านั้น (Phillips 1991e)

### วัสดุพิมพ์ปากซิงค์ออกไซด์ยูจีนอล (Zinc oxide-eugenol impression paste)

วัสดุพิมพ์ปากซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลเป็นวัสดุพิมพ์ปากที่ให้รอยพิมพ์ที่มีความแข็งจริงและมีความเที่ยงตรงสูง ร่วมกับสามารถลอกเลียนรายละเอียดได้ดี (Craig 1989) กลไกการแข็งตัวเป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซิงค์ออกไซด์กับยูจีนอลได้ออกมาเป็นวัสดุแข็ง (hard mass) ที่มีข้อดีคือการใช้งานด้วยวัสดุชนิดนี้สามารถใช้ได้ในงานทันตกรรมหลายชนิด เช่น ใช้เป็นวัสดุรองพื้น (cementing medium), วัสดุปิดแผลผ่าตัด (surgical dressing), วัสดุบูรณะฟันชั่วคราว (temporary filling material), วัสดุบันทึกการสบฟัน (bite registration), วัสดุบูรณะฟันปลอมชั่วคราว (temporary relining material) วัสดุอุดคลองรากฟัน (root canal filling material) และวัสดุพิมพ์ปากสำหรับทำฟันปลอมทั้งปาก เป็นต้น (Anusavice 1996c)

ข้อดีของวัสดุพิมพ์ปากซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลคือ

1. สามารถยึดเกาะได้ดีกับพื้นผิวที่แห้งของคอมปาวด์, เรซิน และ แชลแลค (shellac)
2. มีแรงต้าน (resistance) ที่มากเพียงพอที่จะก่อเป็นขอบของฉาตพิมพ์ปากขึ้นมาได้
3. หลังจากแข็งตัวจะมีความแข็งทำให้สามารถใส่รอยพิมพ์เข้าและออกจากปากซ้ำๆ กันได้ เพื่อเป็นการทดสอบความมีเสถียรภาพและความแนบสนิทกับเนื้อเยื่อ (tissue adaptation) ของรอยพิมพ์
4. มีระยะเวลาการทำงาน (working time) ที่นานเพียงพอ ที่จะทำการก่อขอบ (border molding) ได้
5. มีคุณสมบัติเรื่องความเที่ยงตรงที่ดี, สามารถลอกเลียนรายละเอียดต่างๆ ได้ดี และมีความมีเสถียรภาพทางมิติ
6. ไม่ต้องใช้สารแยกก่อนเทแบบจำลอง (Craig 1989)

ส่วนผสมของซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลจะเป็นส่วนผสม (paste) และส่วนน้ำ ส่วนที่เป็นส่วนผสมประกอบด้วยผงที่เป็นซิงค์ออกไซด์และโรซิน (rosin) ส่วนน้ำประกอบด้วยยูจีนอล (Phillips 1991a) วัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะตามข้อกำหนดที่ 16 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา คือ ชนิดที่ 1 ฮาร์ด-เซต (hard-set) และชนิดที่ 2

ซอฟ-เซท (soft-set) ซึ่งชนิดที่ 1 แข็งตัวเร็วกว่า แต่ก่อนแข็งตัวจะเหลวกว่าและมีความต้านทานต่อการทะลุผ่าน (penetration) มากกว่าชนิดที่ 2 วัสดุพิมพ์ปากซึ่งคือออกไซด์ยูจีนอลที่ใช้สำหรับเป็นวัสดุสำหรับพิมพ์ทับ (wash material) จะมีความเที่ยงตรงที่ดีมาก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเมื่อ 30 นาทีหลังจากผสมมีค่าประมาณ 0.1 % และพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงทางมิติอย่างมีนัยสำคัญ (Reisbick 1982, Craig 1985 และ Craig และคณะ 1975)

ข้อเสียอย่างหนึ่งของวัสดุพิมพ์ปากซึ่งคือออกไซด์ยูจีนอล คืออาจทำให้เกิดอาการปวดแสบปวดร้อนได้เนื่องมาจากการมียูจีนอลอิสระ (free eugenol) ออกมาสัมผัสกับเนื้อเยื่ออ่อน จึงได้มีการผลิตวัสดุที่ไม่มียูจีนอล (non-eugenol) ขึ้น (Phillips 1991a) ซึ่งพบว่าเมื่อไม่มี ยูจีนอลจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายภาพ หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (Reisbick และคณะ 1982) วัสดุที่ไม่มียูจีนอลนี้สามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยปฏิกิริยาสปอนิฟิเคชัน (spontification) เพื่อทำให้เกิดเป็นสบูที่ไม่ละลายเพื่อให้ซึ่งคือออกไซด์ยูจีนอลทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งกรดชนิดนี้เกือบทุกตัวสามารถทำปฏิกิริยากับซึ่งคือออกไซด์ได้ แต่มีกรดอยู่เพียงไม่กี่ตัวเท่านั้นที่สามารถให้สารประกอบซึ่งเป็นที่ต้องการในทางทันตกรรมได้ (Phillips 1991a) กรดที่นำมาใช้ทางด้านทันตกรรมคือกรดออร์โธออกซีเบนโซอิก (Orthoethoxybenzoic acid/EBA) และกรดคาร์บอกซิลิกที่นำมาใช้ไม่จำเป็นต้องอยู่ในรูปของของเหลวเสมอไป โดยที่อาจอยู่ในรูปของผงที่สามารถนำมาละลายในสารบางอย่าง เช่นเอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิหรือความชื้น และสามารถเติมยาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย (bacteriocides) หรือตัวยาอื่น ๆ ลงไปได้โดยไม่รบกวนต่อการเกิดปฏิกิริยาเลย (Anusavice 1996c)

ระยะเวลาการแข็งตัวช่วงต้น (Initial setting time) คือเวลาที่เริ่มผสมจนกระทั่งวัสดุไม่เหนียวติดแท่งโลหะขึ้นมา ส่วนระยะเวลาการแข็งตัวสุดท้าย (final setting time) จะเป็นเวลาที่เริ่มผสมจนแท่งโลหะนั้นไม่สามารถแทงทะลุผิวของวัสดุลงไปได้เกิน 0.2 มม. ภายใต้แรง 50 กรัม ซึ่งระยะเวลาการแข็งตัวสุดท้ายของซึ่งออกไซด์ยูจีนอลชนิดที่ 1 มีค่าประมาณ 10 นาที ส่วนชนิดที่ 2 ประมาณ 15 นาที และระยะเวลาการแข็งตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิและความชื้นสูงขึ้น (Phillips 1991a และ Craig และคณะ 1975) การควบคุมระยะเวลาการแข็งตัวของซึ่งออกไซด์ยูจีนอลสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. เติมสารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) จำนวนเล็กน้อยลงไป เช่นซึ่งอะซิเตต (zinc acetate) หรือหยดน้ำลงไปในส่วนยูจีนอลก่อนผสมจะสามารถเร่งระยะเวลาการแข็งตัวได้ แต่การหยดน้ำลงไปจะต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากผลที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถควบคุมหรือคาดการณ์ได้
2. ลดอุณหภูมิของพวยผสมและแท่นแก้วสำหรับผสม (spatula และ mixing slab) ลง จะช่วยยืดระยะเวลาการผสมให้นานขึ้น แต่อุณหภูมิที่ใช้จะต้องไม่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (dew point)

3. เติมน้ำมันที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยาและซีดีลงไปในขณะที่ผสม เช่นน้ำมันมะกอก (olive oil), น้ำมันแร่ (mineral oil), และปิโตรลาตัม (petrolatum) จะสามารถทำให้ระยะเวลาการแข็งตัวนานขึ้น แต่จะทำให้ความแข็งตัวของวัสดุที่แข็งตัวแล้วลดลงและทำให้ไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous)
4. เปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนผสม ซึ่งสามารถทำได้ทั้งเร่งปฏิกิริยาและหน่วงปฏิกิริยา แต่ถ้าส่วนผสมทั้งสองส่วนมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนประกอบอยู่จะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้
5. เพิ่มระยะเวลาการผสมหรือผสมให้นานขึ้น จะช่วยลดระยะเวลาการแข็งตัวลง แต่การเพิ่มระยะเวลาการผสมจะต้องอยู่ในขอบเขตที่สามารถเพิ่มได้ (Anusavice 1996c)

### วัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid Impression materials)

#### วัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผันกลับได้ (Reversible hydrocolloid Impression materials)

วัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผันกลับได้เป็นวัสดุพิมพ์ปากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากการเป็นเจล (gel) ไปสู่โซล (sol) ด้วยการเพิ่มความร้อน และจากโซลไปสู่เจลด้วยความเย็น เนื่องจากขบวนการนี้สามารถผันกลับได้จึงเรียกวัดชนิดนี้ว่าไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผันกลับได้และอุณหภูมิการเป็นเจล (gelation temperature) ของวัสดุจะต้องมีค่าเท่ากับอุณหภูมิในช่องปากหรือมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิช่องปากเล็กน้อย และเพื่อต้องการให้วัสดุมีการไหลแผ่ไปลอกรายละเอียดต่างๆ ได้ดี วัสดุจะต้องมีอุณหภูมิที่กลายเป็นโซลที่เหมาะสมกับช่องปากด้วย (Phillips 1991b และ Craig 1989) ถ้าวัสดุมีอุณหภูมิการเป็นเจลที่สูงมากเกินไปจะเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก แต่ถ้าอุณหภูมิการเป็นเจลต่ำกว่าอุณหภูมิช่องปากมากๆ จะเป็นการยากที่จะทำให้วัสดุบริเวณที่ติดกับเนื้อเยื่อเย็นตัวลงเพื่อจะกลายเป็นเจล จากข้อกำหนดที่ 11 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกา (American Dental Association) กำหนดให้อุณหภูมิการเป็นเจลไม่ต่ำกว่า  $37^{\circ}\text{C}$  ( $98.6^{\circ}\text{F}$ ) และไม่เกิน  $45^{\circ}\text{C}$  ( $113^{\circ}\text{F}$ ) (Phillips 1991b) อุณหภูมิการเปลี่ยนเป็นเจลที่แน่นอนจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น น้ำหนักโมเลกุล, ความบริสุทธิ์ของอะการ์ และอัตราส่วนของอะการ์ต่อส่วนผสมอื่นๆ (Anusavice 1996a)

อะการ์เจล (Agar gel) ประกอบด้วยแมทริกซ์ตาข่าย (network matrix) ของโมเลกุลอะการ์ซึ่งอยู่ในน้ำ และเมื่อได้รับความร้อนตาข่ายเหล่านั้นจะแตกตัวและได้อะการ์พาร์ติเคิล (agar particles) ที่ลอยอยู่ในน้ำซึ่งเรียกว่าโซล (Craig และคณะ 1975) ความหนืดของโซลเป็นส่วนสำคัญในการใช้งานของวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยที่หลังจากวัสดุถูกทำให้เป็นของไหล (liquefied) ควรจะมีความหนืดเพียงพอที่จะคงอยู่บนสภาพพิมพ์ปากได้ แต่จะต้องไม่มีความหนืดที่มากเกินไปที่จะต้านต่อการกดอัดพิมพ์ปากเข้าที่ในช่องปาก และเมื่อใส่วัสดุเข้าไปในช่องปากก็ไม่ควรจะมี ความหนืดที่มากเกินไปเนื่องจากจะไม่

สามารถไหลแผ่ไปลอกเลียนรายละเอียดต่างๆ ได้ (Phillips 1991b และ Anusavice 1996a)

ส่วนประกอบพื้นฐานของวัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์คืออะการ์ ซึ่งเป็นอนุภาคไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ (organic hydrophilic colloid) ที่สกัดมาจากสาหร่ายทะเล โดยที่มีความเข้มข้นของอะการ์อยู่ในส่วนประกอบประมาณ 8-15% ขึ้นกับว่าต้องการให้คุณสมบัติของวัสดุเป็นเช่นไร และส่วนประกอบหลักโดยน้ำหนักคือน้ำ (>80%) นอกจากนี้มีสารเปลี่ยนแปลงสภาพ (modifiers) บางตัวอยู่เป็นจำนวนเล็กน้อยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุให้ดีขึ้น และนอกจากนี้มีการเติมบอแรกซ์ (borax) ลงไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเจลด้วย (Phillips 1991b และ Anusavice 1996a)

คุณสมบัติวิโคอีลาสติกหรือความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นของวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้ จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วของการให้แรงกระทำ (loading rate) ซึ่งเป็นไปตามลักษณะวิโคอีลาสติกที่มักจะเป็นคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ปากนอนแอควีอัสอีลาสโตเมอร์ (nonaqueous elastomeric impression materials) ไม่ว่าวัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดมันกลับได้นี้จะได้รับชนิดของแรงเป็นแบบใดก็ตาม จะไม่เกิดการคืนกลับอย่างสมบูรณ์และไม่สามารถคืนกลับรูปร่างเดิมได้หลังจากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแล้ว แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรที่เกิดขึ้นนี้ไม่มีความสำคัญทางคลินิกถ้า 1). วัสดุมีปริมาณของเจลมากเพียงพอ 2). ใช้การดึงวัสดุออกจากปากอย่างรวดเร็ว และ 3). มีปริมาณส่วนเคล็ดในบริเวณที่พิมพ์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Anusavice 1996a)

### วัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดมันกลับไม่ได้ (Irreversible hydrocolloid impression materials)

วัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดมันกลับไม่ได้หรือวัสดุพิมพ์ปากอัลจinate (alginate impression material) เป็นวัสดุพิมพ์ปากที่มีข้อดีหลายประการคือ ใช้งานง่าย, ผู้ป่วยรู้สึกสะดวกสบาย, วัสดุที่แข็งตัวแล้วสามารถมีความโค้งงอ (flexibility) ที่ดี, มีความเที่ยงตรงสูงเมื่อใช้อย่างถูกวิธี, ราคาไม่แพง และไม่ต้องการอุปกรณ์ที่ยุ่งยาก (Craig และคณะ 1975, Phillips 1991c และ Anusavice 1996a) ส่วนประกอบหลักของวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้คืออัลจinateที่ละลายน้ำได้ (soluble alginate) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์เส้นตรง (linear polymer) ของเกลือโซเดียมของกรดแอนไฮโดร-เบตา-ดี-แมนนูโรนิก (sodium salt of anhydro-beta-d-mannuronic acid) เมื่ออัลจinateที่ละลายน้ำได้ผสมกับน้ำจะเกิดโซลชันเหมือนกับอะการ์โซล ซึ่งโซลที่เกิดขึ้นนี้จะค่อนข้างมีความหนืดมากแม้จะมีความเข้มข้นต่ำ และถ้าสารประกอบอัลจinate (alginate compound) มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง จะทำให้โซลที่ได้มีความหนืดมากขึ้นไปด้วย การเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจลของวัสดุพิมพ์ปากอัลจinateนี้จะเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมี โดยที่อุณหภูมิจะไม่ใช่ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นเจล (gelation) ขึ้น (Phillips 1991c)

ระยะเวลาการเกิดเป็นเจล (gelation time) คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งถึงวัสดุกลายเป็นเจล ซึ่งเป็นช่วงเวลาสำหรับการผสมวัสดุ, การใส่วัสดุลงในถาดพิมพ์ปาก และการใส่ถาดพิมพ์ปากนั้นเข้าไปในปากผู้ป่วย ถ้าทันตแพทย์ใส่ถาดพิมพ์ปากเข้าปากผู้ป่วยเมื่อเลยระยะเวลาการเกิดเป็นเจลแล้ว จะได้รอยพิมพ์ปากที่มีการบิดเบี้ยวไม่สามารถใช้งานได้ และเมื่อวัสดุเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นเจลแล้วไม่ควรจะขยับถาดพิมพ์ปากเลยเพราะจะทำให้เกิดการแตกของเส้นใย (fibris) อย่างถาวรซึ่งจะไม่สามารถกลับมาเชื่อมต่อกันได้อีกเป็นผลให้รอยพิมพ์ที่ได้ไม่แข็งแรง ระยะเวลาการเกิดเป็นเจลที่เหมาะสมคือระหว่าง 3-4 นาทีที่ 20°C (68°F) การตรวจสอบระยะเวลาการเกิดเป็นเจลอย่างง่าย ๆ คือ ใช้การจับเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนกระทั่งวัสดุไม่เหนียวติดนิ้วมือที่แห้งและสะอาดขึ้นมา (Phillips 1991c) การควบคุมระยะเวลาการเกิดเป็นเจลสามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างผงกับน้ำหรือเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการผสม แต่การควบคุมระยะเวลาการเกิดเป็นเจลโดยวิธีเหล่านี้จะมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของเจล เช่นทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความยืดหยุ่นลดลง ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดคือการผสมตัวหน่วงปฏิกิริยา (retarder) ลงไปในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังมีวิธีที่ปลอดภัยอีกวิธีหนึ่งคือการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ผสม โดยที่อุณหภูมิของน้ำยิ่งสูงระยะเวลาการเกิดเป็นเจลก็จะยิ่งสั้นลงเป็นต้น (Phillips 1991a และ Anusavice 1996a)

วัสดุพิมพ์ปากอสังเอนดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามข้อกำหนดที่ 18 ของสมาคมทันตแพทย์แห่งสหรัฐอเมริกาคือประเภทที่ 1 แข็งตัวเร็ว (type I fast setting) ซึ่งช่วงเวลาที่เกิดเป็นเจลจะอยู่ระหว่าง 1-2 นาที และประเภทที่ 2 แข็งตัวปกติ (type II normal setting) ช่วงเวลาที่เกิดเป็นเจลอยู่ระหว่าง 2-4.5 นาที สิ่งที่ใช้ควบคุมระยะเวลาการเกิดเป็นเจลคือปริมาณของตัวหน่วงปฏิกิริยาที่เติมลงไป แต่เป็นวิธีการที่เป็นไปไม่ได้เนื่องจากปริมาณของตัวหน่วงปฏิกิริยานั้นสำคัญมากและทางบริษัทผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนดปริมาณมาให้เอง ถึงแม้ว่าวัสดุพิมพ์ปากอสังเอนดจะสามารถใช้ได้ดีกับการทำฟันปลอมชนิดถอดได้ก็ตามแต่ยังไม่เป็นที่น่าพอใจสำหรับการทำฟันปลอมชนิดติดแน่นตราบไคที่ยังต้องให้ความสำคัญกับแบบจำลองต้นแบบ (master cast) และตาย (die) อยู่ เนื่องจากอสังเอนดยังลอกเลียนรายละเอียดได้ไม่ค่อยดีนัก และมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างอสังเอนดกับพลาสติกเรซินสำหรับเทแบบจำลองทำให้แบบจำลองที่ได้มีรายละเอียดที่ไม่คมชัดนัก และพื้นผิวของแบบจำลองที่ได้จะมีความสามารถในการทนทานต่อการขัดขีด (abrasion resistance) ในขณะตัดแต่งซี่มั่งได้ต่ำอีกด้วย (Reisbick และคณะ 1982)

เพื่อให้การพิมพ์ปากด้วยอสังเอนดได้ผลดีควรจะมีการทำความสะอาดฟัน และควรให้ผู้ป่วยบ้วนน้ำ การที่ช่องปากแห้งเกินไปจะทำให้อสังเอนดติดบริเวณเนื้อเยื่อที่แห้งนั้น นอกจากนี้ควรผสมให้วัสดุเหนียวเป็นเนื้อเดียวกันและใส่ลงในถาดพิมพ์ปากที่มีส่วนคอดสำหรับยึดวัสดุ (mechanical undercut) หรือหากาวยึดถาดพิมพ์ปาก (tray adhesive) ซึ่งการหากาวยึดถาดพิมพ์ปากจะป้องกันการหลุดของวัสดุออกจากถาดพิมพ์ปาก ซึ่งบางครั้งเป็นการหลุดออกเพียง



เล็กน้อยที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าซึ่งสามารถทำให้เกิดการบิดเบี้ยวขึ้นได้ และก่อนที่จะใส่วัสดุเข้าไปในปากควรป้ายวัสดุปริมาณเล็กน้อยไปบนฟัน, เพดานปาก และกระพุ้งแก้ม (vestibule) เสียก่อน เมื่อวัสดุเริ่มหายเหนียวติดมือแสดงว่าเริ่มมีการแข็งตัวช่วงต้น (initial set) ของวัสดุแล้ว ควรรอดูไปอีกประมาณ 2-3 นาทีหลังจากวัสดุหายเหนียว แล้วจึงดึงออกจากปากด้วยความรวดเร็ว (Reisbick 1982)

วัสดุพิมพ์ปากอัสจินเนตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก ดังนั้นความสามารถในการต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อดึงรอยพิมพ์ออกจากปากอย่างรวดเร็ว ควรหลีกเลี่ยงการบิดหรือโยกรอยพิมพ์ในขณะที่ดึงออกจากปาก โดยมีเหตุผลเดียวกันกับวัสดุพิมพ์ปากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดผันกลับได้ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น (Anusavice 1996a)

### วัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ (Elastomeric Impression materials)

วัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุที่มีธรรมชาติคล้ายยาง (rubber-like) ซึ่งวัสดุอีลาสโตเมอร์นี้จะประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งมีพันธะระหว่างโมเลกุลที่ไม่แข็งแรงนัก โมเลกุลเหล่านี้จะมัดติดกันเป็นตาข่ายสามมิติ (three-dimensional network) โดยสารเชื่อมขวาง เมื่อวัสดุถูกดึงให้ยืดออกโมเลกุลก็จะคลายเกลียว และเมื่อปล่อยหรือเอาแรงออกวัสดุก็จะหดกลับมาสู่สภาพเดิม ปริมาณของสารเชื่อมขวางนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความแข็งและความยืดหยุ่นของวัสดุ วัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้มักจะประกอบด้วย 2 ระบบ คือโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) และ/หรือการเชื่อมขวาง (cross-linking) ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (condensation reaction) หรือปฏิกิริยาแอดดิชัน (addition reaction)

เมื่อแบ่งวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ออกตามลักษณะทางเคมี จะสามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิดดังนี้ โพลิซัลไฟด์ (polysulfide), คอนเดนเซชันซิลิโคน (condensation silicone), แอดดิชันซิลิโคน (addition silicone) และโพลีเอเธอร์ (polyether) ในปัจจุบันนี้มีชนิดของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้นไปอีก 1 ชนิดคือโพลีเอเธอร์ยูรีเทนไดเมทาคริเลต (polyether urethane dimethacrylate) ชนิดแข็งตัวด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Phillips 1991d)

คุณสมบัติรีโอโลยีของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการทำงาน โดยที่เมื่อใช้งานวัสดุเหล่านี้จะต้องอยู่ในรูปของไหลหนืด (viscous liquid) ที่มีการปรับการไหลแผ่ให้เหมาะสม และหลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาการแข็งตัวเปลี่ยนเข้าสู่ของแข็งวิสโคอีลาสติก (viscoelastic solid) ลักษณะการไหลแผ่ของของแข็งนี้ยังคงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการที่จะได้มาซึ่งรอยพิมพ์ที่มีความเที่ยงตรง แม้กระทั่งความหนืดและลักษณะการไหลแผ่ของส่วนผสมแต่ละส่วนก็มีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากเป็นส่วนที่ช่วยควบคุมการผสม, ปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นในขณะผสม และการหนีออกของฟองอากาศที่เกิดขึ้นก่อนที่จะ

เริ่มพิมพ์ปาก วัสดุพิมพ์ปากในปัจจุบันนี้สามารถบันทึกรายละเอียดต่างๆ ได้อย่างเที่ยงตรง ถ้าใช้วัสดุอย่างถูกต้อง การบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นในขณะที่วัสดุออกจากปากจะเกิดขึ้นน้อยที่สุดถ้าทันตแพทย์ระลึกรู้เสมอว่าการทำให้เกิดความเครียดอย่างรวดเร็วต่อวัสดุจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรน้อยที่สุด และเป็นการเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาดให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามควรตั้งวัสดุออกหลังจากที่ได้กำจัดสภาพความเป็นสูญญากาศระหว่างตัววัสดุกับเนื้อเยื่อในช่องปากเสียก่อน มิฉะนั้นจะเป็นการก่อให้เกิดความรู้สึกไม่สบายต่อผู้ป่วยได้ และอีกเหตุผลหนึ่งคือเป็นการลดความเสี่ยงของการเกิดการบิดเบี้ยวอย่างถาวรที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้แรงที่มากเกินไปในการพยายามดึงวัสดุออกจากปาก วิธีที่ดีที่สุดในการกำจัดสภาพสูญญากาศคือการดึงขอบของถาดพิมพ์ปากในทิศทางขนานกับแนวถอดใส่ของถาดพิมพ์ปากหลายๆ ครั้งจนกระทั่งมีอากาศรั่วเข้าไประหว่างวัสดุพิมพ์ปากกับเนื้อเยื่อได้ หลังจากนั้นจึงดึงที่ด้ามจับของถาดพิมพ์ปากอย่างรวดเร็ว โดยให้มีแรงบิดเกิดขึ้นน้อยที่สุด (Anusavice 1996b)

### วัสดุพิมพ์ปากโพลีซัลไฟด์ (Polysulfide rubber impression materials)

วัสดุพิมพ์ปากโพลีซัลไฟด์ถูกนำมาใช้งานทางทันตกรรมเนื่องมาจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ หนึ่ง, วัสดุสามารถโค้งงอ (flexible) ได้แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในมิติเมื่อเก็บไว้ช่วงเวลาหนึ่งก่อนการเทแบบ สอง, สามารถทำอิเล็กโทรเพลต (electroplate) ได้ทำให้สามารถเตรียมตายโลหะได้ สาม, มีความแข็งแรงและการต้านทานต่อการฉีกขาดได้ดีกว่าอะครีลหรืออัลจินเนต โพลีซัลไฟด์ที่นำมาใช้ในตอนแรกมักถูกจะเรียกว่า ไทโธคอล (thiokol) ซึ่งเรียกตามชื่อบริษัทที่ผลิต ต่อมาใช้ชื่อ เมอร์แคปแทน (mercaptan) เนื่องจากในส่วนของเบสที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยามีกกลุ่มเมอร์แคปแทน (-SH) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะเป็นตัวที่ทำปฏิกิริยาในระหว่างเกิดการแข็งตัวเพื่อเปลี่ยนสภาพเป็นยางที่มีกลุ่มโพลีซัลไฟด์อยู่ (Craig 1975)

วัสดุพิมพ์ปากโพลีซัลไฟด์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเบสและตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนชนิดต่างๆ ของวัสดุชนิดนี้จะแบ่งจากความหนืดและการไหลแผ่เมื่อได้รับแรง โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้ไลต์บอดี้ (light-bodied), เรกูลาร์บอดี้ (regular-bodied) และเฮฟวี่บอดี้ (heavy-bodied) แต่แนวโน้มในปัจจุบันจะเป็นไปในทางการใช้วัสดุที่มีความหนืดชนิดเดียวในการพิมพ์ทั้งหมด ซึ่งการไหลแผ่ไม่ได้ขึ้นกับน้ำหนักของวัสดุ แต่จะขึ้นกับแรงปริมาณเล็กน้อยที่วัสดุได้รับ ส่วนผสมที่เป็นเบสประกอบด้วย โพลีเมอร์อินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight organic polymer) 80% และสารเพิ่มความแข็งแรง (reinforcing agent) เช่นซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) อีก 20% ส่วนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารประกอบที่ให้กลุ่มเมอร์แคปแทนเพื่อไปทำปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็นยางโพลีซัลไฟด์ (polysulfide rubber) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในน้ำมันที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยา (inert oil) เช่น ไดบิว ทิลฟทาเลต (dibutyl phthalate) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันโดยทั่วไปคือเสต

ไดออกไซด์ ( $PbO_2$ ) โดยที่อาจมีหรือไม่มีแมงกานีสไดออกไซด์ ( $MnO_2$ ) ก็ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุชนิดนี้มีสีน้ำตาลเข้มถึงเทาเข้ม สารเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ใช้ได้แก่คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และเปอร์ออกไซด์ โดยที่คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์จะทำให้วัสดุออกเป็นสีน้ำเงินเขียว (Craig และคณะ 1975 และ Craig 1989)

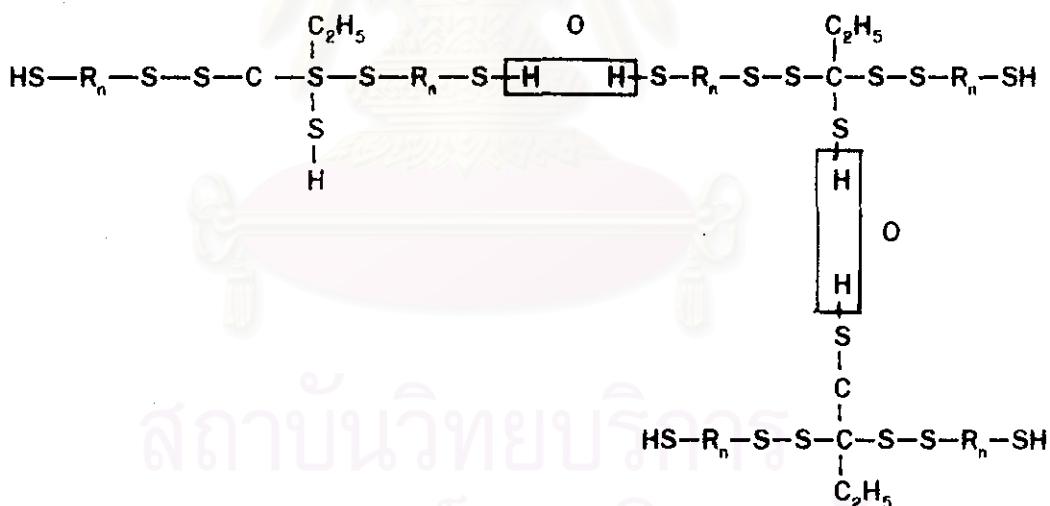
ความหนืดของวัสดุชนิดนี้ถูกควบคุมโดยน้ำหนักโมเลกุลของเมอร์แคปแทนและการเลือกใช้สารเพิ่มความแข็งแรง ส่วนความข้นของเนื้อวัสดุ (consistency) จะถูกควบคุมโดยการเลือกสารเพิ่มความแข็งแรงที่เหมาะสม ซึ่งจะให้ผลออกมาเป็นอิกโซโทรปิกเพสต์ (Thixotropic paste) ที่มีการไหลแผ่หน้อยเมื่อได้รับแรงกระทำต่ำ แต่จะมีลักษณะเหลวมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรง เช่นในขณะกำลังผสมวัสดุเข้าด้วยกันเป็นต้น (Craig และคณะ 1975)

ปฏิกิริยาการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์เป็นปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของกลุ่มเมอร์แคปแทน และเกิดจากการที่โมเลกุล 2 ชนิดที่แตกต่างกันที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยามารวมตัวกัน ดังสมการทางเคมีต่อไปนี้



น้ำ

ปฏิกิริยาเหล่านี้จะสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีกลุ่ม  $-SH$  ทำปฏิกิริยากัน ดังแผนภาพ



น้ำหนักโมเลกุลของเมอร์แคปแทนอยู่ระหว่าง 2000 ถึง 4000 ดังนั้นการรวมกันของกลุ่ม  $-SH$  2 กลุ่มเข้าด้วยกันจากการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลขึ้น (Craig และคณะ 1975) การเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลนี้จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งส่วนผสมนั้นกลายสภาพเป็นยาง การเกิดปฏิกิริยาการแข็งตัวนี้มีการคายความร้อนเพียงเล็กน้อย โดยปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าประมาณ 3 ถึง  $4^\circ\text{C}$  เท่านั้น (Craig 1989) ซึ่งโดยปกติปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุทั้งหมด และปริมาณความเข้มข้นของตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคอนเดนเซชันซึ่งมีผลพลอยได้คือน้ำ

และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะได้รับผลกระทบจากความชื้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะร้อนขึ้นจะมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น (Anusavice 1996b)

ถึงแม้ว่าวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้จะมีส่วนประกอบของเลดไดออกไซด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาก็ตาม แต่เมื่อใช้วัสดุอย่างถูกวิธีจะไม่มีอันตรายแต่อย่างใด ทางบริษัทผู้ผลิตทำให้ส่วนผสมทั้งสองส่วนมีสีที่แตกต่างกันเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตว่าได้ผสมทั้งสองส่วนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนี้จะใช้เวลาในการผสม 45 วินาที หรือไม่ควรนานเกิน 1 นาที ส่วนระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์มีค่าประมาณ 5-7 นาที และระยะเวลาการแข็งตัวสุดท้ายมีค่าประมาณ 8-12 นาทีนับจากเวลาที่เริ่มผสม (Craig และคณะ 1975) เมื่อมีการหยดน้ำลงไปเพียงเล็กน้อยจะเป็นการเร่งอัตราการแข็งตัวของโพลีซิลไฟด์ โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยา แต่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และยังไปกว่านั้นส่วนผสมที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบไปด้วยตัวหน่วงปฏิกิริยาและตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (reactor) ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยาอาจให้การเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันที่ไม่สามารถคาดเดาได้ (Anusavice 1996b)

ถึงแม้ว่าส่วนผสมจะกลายเป็นยางภายในเวลา 10-20 นาทีก็ตาม แต่จะยังคงมีการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่อไปอีกเป็นเวลาหลายชั่วโมง แต่การมีปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกดหรือเกิดขณะดึงวัสดุออกจากปาก (Craig 1989) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุโพลีซิลไฟด์เมื่อได้รับแรงกด 12% เป็นเวลา 30 วินาทีมีค่าประมาณ 2% ถึง 3% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุไม่ได้มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ (perfectly elastic) แต่การที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรน้อยกว่า 4% ถือว่าเป็นที่ยอมรับได้ ทางด้านความมีเสถียรภาพทางมิติ โพลีซิลไฟด์มีการหดตัว 0.1% ถึง 0.3% ใน 24 ชั่วโมงแรก ดังนั้นควรเก็บแบบจำลองภายในช่วงเวลานี้ จากการศึกษาพบว่าความเที่ยงตรงจะมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อทิ้งแบบจำลองไว้ 30 นาทีหลังจากดึงออกจากปากและไม่ควรทิ้งไว้นานเกินกว่านี้ ค่าของการไหลแม่ที่พิจารณาจากการให้แรงขนาด 100 กรัมบนวัสดุที่แข็งตัวแล้วเป็นเวลา 1 ชั่วโมงหลังจากเริ่มผสม จะมีค่า 0.3% ถึง 0.9% เกิดขึ้นในเวลา 15 นาที เป็นผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของรอยพิมพ์ปากขึ้น (Craig และคณะ 1975)

ความยืดหยุ่นของวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้จะดีขึ้นตามเวลาที่ปล่อยให้วัสดุแข็งตัว (curing time) หรืออาจกล่าวได้ว่ายิ่งทิ้งวัสดุไว้ในปากนานเท่าใดรอยพิมพ์ปากที่ได้ก็จะมี ความเที่ยงตรงมากขึ้นเท่านั้น และจากการดึงวัสดุออกจากปากจะมีการบิดเบี้ยวเกิดขึ้นเสมอแต่การที่วัสดุมีคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกจะสามารถช่วยลดการบิดเบี้ยวให้น้อยลงได้ ระยะเวลาการแข็งตัวที่บริษัทผู้ผลิตแจ้งไว้หรือที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดความหนืดไม่ใช่เวลาที่นานเพียงพอ

สำหรับเกิดความยืดหยุ่นที่มากพอที่จะป้องกันการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรในขณะดึงวัสดุออกจากปากได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวัสดุโพลีซิลไฟด์ (Anusavice 1996b)

วัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์มีการคืนกลับหลังจากที่ได้รับความเครียดได้ช้ากว่าวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์อื่นๆ และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรหลังจากที่ได้รับความเครียดมากกว่าวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์อื่นๆ อีกด้วย แต่ทั้งๆ ที่โพลีซิลไฟด์สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงทางมิติได้มาก ก็ไม่จำเป็นต้องทิ้งวัสดุไว้ก่อนเทแบบจำลองเนื่องจากเมื่อสายไซโมเลกุลถูกยืดออกจนเลยขีดจำกัดทางอีลาสติก (elastic limit) แล้ว การทิ้งรอยพิมพ์ปากไว้ก่อนเทแบบจำลองจะไม่สามารถช่วยให้คืนกลับสู่สภาพเดิมได้ (Anusavice 1996b)

ได้มีผู้ทำการศึกษามูลของการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยาของวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์ โดยสัดส่วนเบสต่อส่วนเร่งปฏิกิริยาที่ทำการทดสอบคือ 30/70, 40/60, 50/50, 60/40 และ 70/30 เขาได้เลือกทดสอบเกี่ยวกับการแข็งตัวของร่างกายได้แรงกด (compression set), ความเครียดจากแรงกด (strain in compression), ความชื้นของเนื้อวัสดุ, เศษของโซล (sol fraction) และสัดส่วนการบวม (swell ratio) โดยทำการทดสอบ 3 อย่างแรกทำตามข้อกำหนดที่ 19 ของทันตแพทยสมาคมแห่งสหรัฐอเมริกา ผลการทดสอบสรุปว่าวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์ไม่จำเป็นต้องมีสัดส่วนที่เท่ากันพอดี แต่สามารถเปลี่ยนแปลงสัดส่วนได้ประมาณ  $\pm 20\%$  ของปริมาณที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ โดยยังคงมีคุณสมบัติตามที่ทันตแพทยสมาคมแห่งสหรัฐอเมริกาคำหนด ยกเว้นเฉพาะจะมีผลกระทบต่อความชื้นของเนื้อวัสดุและพบว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนมากกว่า 20% จะมีการเพิ่มการไหลแผ่ก่อนการแข็งตัวของวัสดุเกิดขึ้น (Rueggeberg และ Paschal 1994)

### วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคน (Silicone rubber impression materials)

วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดคอนเดนเซชัน (condensation silicone) และชนิดแอดดิชัน (addition silicone) วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนที่ผลิตออกมาในช่วงแรกมีข้อเสียหลายอย่าง เช่น มีอายุการเก็บสั้น ซึ่งโดยมากมักเป็นผลมาจากการที่วัสดุมีความหนืดเพิ่มขึ้น, มีช่วงเวลาการแข็งตัวที่สั้น, มีการเปลี่ยนแปลงทางมิติมากหลังจากแข็งตัว, และมีการปล่อยก๊าซออกมาหลังจากแข็งตัวซึ่งทำให้แบบจำลองที่ได้มีรูพรุน แต่ในปัจจุบันนี้ปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขแล้วจนทำให้วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนเป็นวัสดุพิมพ์ปากที่มีคุณสมบัติที่ดีและเป็นที่ยอมรับของทันตแพทย์ทั่วไป

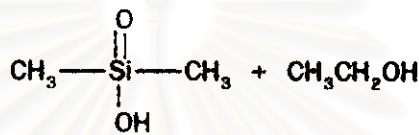
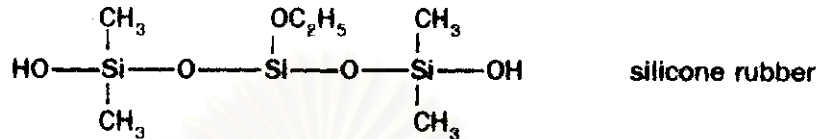
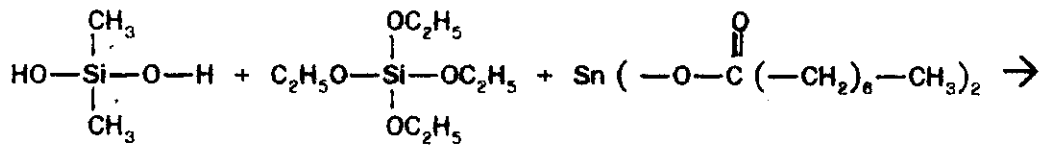
วัสดุพิมพ์ปากนี้ประกอบด้วยส่วนของเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยา ในส่วนของเบสมีของเหลวซิลิโคนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำปานกลาง (moderately low molecular weight silicone liquid) ที่เรียกว่าไดเมทิลซิลอกเซน (dimethylsiloxane) ซึ่งมีกลุ่มไฮดรอกซิลที่ไวต่อปฏิกิริยาเป็นส่วนประกอบอยู่ นอกจากนี้ยังมีสารเพิ่มความแข็งแรง (reinforcing agents)

เช่นซิลิกา (silica) เพื่อให้มีความชื้นของวัสดุที่เหมาะสม และให้ยางที่จะเกิดขึ้นมีความแข็ง (stiffness) ส่วนเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารแขวนลอยทินออกโตเอต (tin octoate suspension) และอัลคิลซิลิเกต (alkyl silicate) วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนมีชนิดของความชื้นต่างๆ กัน 4 แบบ คือ โลทบอดี, เรกูลาร์บอดี, เฮฟวีบอดี, และเวรีเฮฟวีบอดี (very heavy-bodied) ซึ่งควบคุมความหนืดโดยการเลือกน้ำหนักโมเลกุลของไดเมทิลซิลอกเซนและความเข้มข้นของสารเพิ่มความแข็งแรง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลที่เลือกใช้สูงขึ้นความหนืดของวัสดุก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนความเข้มข้นของสารเพิ่มความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นจาก 35% ถึง 40% เมื่อเป็นโลทบอดีถึงเฮฟวีบอดี และ 75% สำหรับชนิดเวรีเฮฟวีบอดีหรือชนิดพัตตี (putty type) (Craig และคณะ 1975) นอกจากนี้ยังมีชนิดที่เป็นโมนิเฟส (monophase) หรือมีความชื้นของเนื้อวัสดุแบบเดียว (single consistency) ที่มีคุณสมบัติความบางเมื่อได้รับแรงเฉือน (shear thinning) ซึ่งสามารถใช้ได้กับทั้งธาตุพิมพ์ปากและกับหลอดฉีด (Craig 1989)

วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนเป็นวัสดุพิมพ์ปากที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อผสมน้ำเข้ากับพลาสติกสำหรับเทแบบจำลองแล้วนำมาเทบนวัสดุพิมพ์ปากนี้ จะเกิดมุมสัมผัส (contact angles) ที่สูง และเกิดฟองอากาศที่แบบจำลองนั้น ดังนั้นบางบริษัทจึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ลงไปในวัสดุอัดดีชันซิลิโคนเพื่อลดมุมสัมผัสให้เหลือน้อยกว่า  $45^{\circ}$ , ปรับปรุงความสามารถในการเปียกน้ำ และทำให้เทแบบจำลองได้ง่ายขึ้นเนื่องจากการเกิดฟองอากาศจะน้อยลง เรียกวัสดุชนิดนี้ว่า ไฮโดรฟิลิกอัดดีชันซิลิโคน (hydrophilic addition silicone impression material) (Craig 1989 และ Craig และ Sun 1994) ซึ่งมีการศึกษาหนึ่งที่พบว่าความสามารถในการเปียกน้ำของวัสดุพิมพ์ปากไฮโดรฟิลิกอัดดีชันซิลิโคนนี้ไม่ได้แตกต่างไปจากวัสดุพิมพ์ปากโพลีอีเธอร์อย่างมีนัยสำคัญ (Pratten และ Craig 1989) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงความสามารถในการไล่น้ำ (water-displacing ability) ของซิลิโคนที่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติใดของวัสดุ ผลปรากฏว่ามีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilicity) และความหนืดของวัสดุ ซึ่งความสามารถในการไล่น้ำนี้เป็นสิ่งสำคัญของความสามารถในการลอกเลียนรายละเอียดของวัสดุพิมพ์ปากบนผิวเนื้อฟันที่เปียกชื้น (wet dentin) (Peutzfeldt และ Asmussen 1988)

นอกจากการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในวัสดุซิลิโคนเพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความสามารถในการเปียกน้ำดังที่ได้อธิบายมาแล้ว ยังมีวิธีอื่นที่สามารถทำได้เช่นกัน เช่นการใช้พลาสมา (plasma treatment) เพื่อให้พื้นผิวของวัสดุพิมพ์ปากมีพลังงานสูงขึ้น และมีความสามารถในการเปียกน้ำสูงขึ้นด้วย แต่เป็นวิธีการที่ยุ่งยากและราคาแพง (Bochiechio และคณะ 1991 และ Vassilakos และคณะ 1993)

ปฏิกิริยาเคมีของวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้



ไดเมทิลไฮดรอกซีซิลอกเซน + ออร์โธเอทิลซิลิเกต + ทินออกไซด์  $\rightarrow$  ยางซิลิโคน + เอทิลแอลกอฮอล์

การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคน ที่อุณหภูมิ 37°C จะประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1. ซิลิโคนโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลกลุ่มปลาย (terminal group) เป็นกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl group)
2. สารเชื่อมขวาง (cross-linking agent) ซึ่งอาจเป็น
  - อัลคอกซีออร์โธซิลิเกต (alkoxy ortho-silicate) หรือ
  - ออกาโนไฮโดรเจนซิลอกเซน (organohydrogen siloxane)
 ซึ่งสารเหล่านี้ทำหน้าที่กำจัดแอลกอฮอล์ หรือ ก๊าซไฮโดรเจนออกจากวัสดุ
3. ตัวเร่งปฏิกิริยา (activator) โดยปกติเป็นสารประกอบออกาโนติน (organotin compound) (Braden และ Elliott 1966)

ระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนสั้นกว่าโพลีซิลไฟด์ และระยะเวลาการแข็งตัวก็น้อยกว่าด้วยคืออยู่ในช่วงประมาณ 6-8 นาที ในเรื่องของความเหนียวซิลิโคนมีความเหนียวต่ำกว่าวัสดุโพลีซิลไฟด์ชนิดเดียวกันทำให้ผสมง่ายกว่าวัสดุโพลีซิลไฟด์ การเปลี่ยนแปลงทางมิติในระหว่าง 24 ชั่วโมงหลังจากแข็งตัวมีค่ามากกว่าโพลีซิลไฟด์ การเปลี่ยนแปลงทางมิติจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของฟิลเลอร์ (filler) ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของซิลิโคนมีค่าต่ำกว่าของโพลีซิลไฟด์เนื่องจากคุณสมบัตินี้มีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางในซิลิโคน การไหลแผ่ของซิลิโคนที่เวลา 1 ชั่วโมงหลังจากแข็งตัวมีค่าน้อยกว่า

โพลีซิลไฟด์ ดังนั้นจึงสามารถงอได้น้อยกว่าด้วย ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางและมีการเกิดปฏิกิริยาการแข็งตัวที่รวดเร็ว นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของสารเพิ่มความแข็งแรงในตัววัสดุก็มีผลเช่นกัน

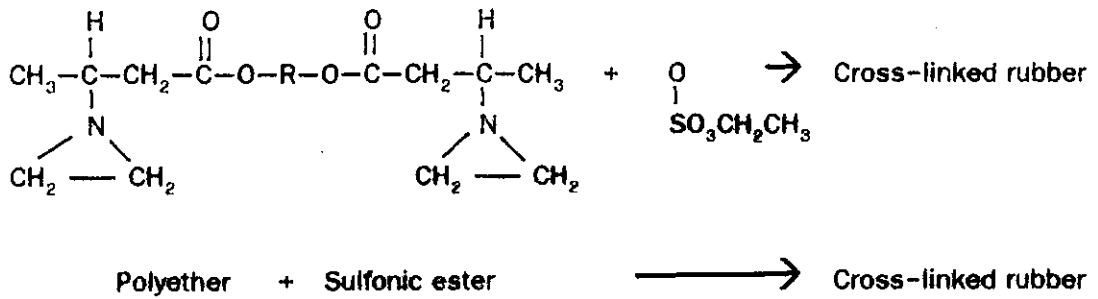
วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนไม่มีพิษต่อเนื้อเยื่อ ดังนั้นจึงสามารถสัมผัสตัววัสดุได้แต่ควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสส่วนเร่งปฏิกิริยาโดยตรง เนื่องจากสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาภูมิแพ้ได้ (Craig และคณะ 1975) วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนหรือโพลีไวเนลไซลอกเซน เป็นวัสดุพิมพ์ปากที่ทันตแพทย์ส่วนใหญ่นิยมใช้เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกลที่ดีและสามารถใช้งานได้ง่าย แต่ซิลิโคนก็เป็นวัสดุพิมพ์ปากที่มีความไวต่อเทคนิคการใช้งาน (technique sensitive) ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างมากเพื่อให้รอยพิมพ์ปากที่ได้ออกมาดีที่สุด Chee และ Donovan ได้ให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับการใช้วัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้ไว้ว่า บริเวณที่จะทำการพิมพ์ต้องแห้งสนิท, ควรใช้ก๊ับกดอัดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล, งดมือยางหลายๆ ชนิดสามารถขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันได้ ดังนั้นอาจเปลี่ยนไปใช้ถุงมือชนิดที่ไม่มีสารปนเปื้อน (noncontaminating gloves) แทน และควรหลีกเลี่ยงการใช้เทคนิคผสมสองครั้งพิมพ์ครั้งเดียว (double mix single impression) (Chee และ Donovan 1992)

คุณสมบัติรีโอโลยีของซิลิโคนเป็นดังเช่นวัสดุอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยที่วัสดุจะมีการตอบสนองในลักษณะวิสโคอีลาสติกเมื่อได้รับความเครียดอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นจะสามารถคืนกลับได้ แต่เมื่อใดที่มีความเครียดยาวนานขึ้นไปอีกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องมาจากสายโซ่โมเลกุลตอบสนองต่อความเครียดในลักษณะของสารที่มีความหนืด (viscous manner) (Anusavice 1996b)

#### วัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์ (Polyether rubber impression materials)

วัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์เป็นอีลาสโตเมอร์ชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์ในการพิมพ์ปาก (Anusavice 1996b) วัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์อยู่ในรูปของเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยา ส่วนของเบสเป็นโพลีเอเธอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำปานกลาง (moderately low molecular weight polyether) ซึ่งมีโมเลกุลกลุ่มปลายเป็นเอธิลีนอิมีน (ethylene imine) และโมเลกุลกลุ่มปลายเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกันโดยการทำหน้าที่ของอะโรมาติกซัลโฟนิคแอซิดเอสเทอร์ (aromatic sulfonic acid ester) ทำให้เกิดเป็นยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและเชื่อมโยงกัน (cross-linked high molecular weight rubber) ดังแผนภาพต่อไปนี้





ปฏิกิริยาการแข็งตัวของโพลีเอเธอร์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่มากกว่าวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์อื่นๆ เล็กน้อย โดยมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นประมาณ  $4^{\circ}\text{C}$  (Cralg 1989)

วัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์เป็นวัสดุพิมพ์ปากที่มีระยะเวลาการทำงานที่สั้นที่สุดในบรรดาวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ และมีลักษณะของเนื้อวัสดุที่แข็งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเรกูลาร์บอดีของวัสดุอีลาสโตเมอร์ชนิดอื่น ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรมีน้อยกว่าวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์แต่ไม่ต่ำเท่าซิลิโคน ในขณะที่มีการไหลแผ่ภายหลังจากแข็งตัวน้อยกว่าโพลีซิลไฟด์หรือซิลิโคน เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางและมีความแข็งมาก ซึ่งการที่มีความแข็งที่สูงจะทำให้มีความสามารถในการงอที่ต่ำเป็นผลให้การดึงวัสดุออกจากปากทำได้ยาก ส่วนความมีเสถียรภาพทางมิติมีค่าระหว่างของโพลีซิลไฟด์และซิลิโคน แต่ความมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในน้ำของโพลีเอเธอร์ไม่ต่ำเท่าโพลีซิลไฟด์และซิลิโคน

คุณสมบัติรีโอสยิ ของโพลีเอเธอร์ มีบทบาทสำคัญมากในการใช้งานวัสดุให้มีประสิทธิภาพและเที่ยงตรงมากที่สุด และการที่วัสดุมีคุณสมบัติสุโตพลาสติกจะทำให้สามารถใช้วัสดุที่มีความหนืดเดียวได้กับทั้งฉาตพิมพ์ปากและกระบอกฉีด (Anusavice 1996b) ความหนืดของส่วนผสมสามารถลดลงได้โดยการใช้ทินเนอร์ (thinner) ซึ่งบางครั้งแนะนำให้ใช้ในกรณีของการทำฟันปลอมทั้งปาก แต่การใส่ทินเนอร์จะทำให้อัตราการแข็งตัวช้าลงและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเช่นลดความแข็งของวัสดุที่แข็งตัวแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาอะโรมาติกซิลไฟน์กแอซิดเอสเทอร์ สามารถทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังได้ ดังนั้นการผสมส่วนผสมเร่งปฏิกิริยาโดยตรงควรจะหลีกเลี่ยง และการผสมส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยาให้เข้ากันดีก็จะเป็นการป้องกันการระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อในช่องปาก (Cralg และคณะ 1975 และ Anusavice 1996b)

Braden และคณะในปี 1972 ได้ศึกษาคุณสมบัติรีโอสยิของส่วนเบสของวัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์ และส่วนเบสที่ผสมกับทินเนอร์โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลดทดสอบวัดความหนืดที่เปลี่ยนไปตามอัตราเร็วแรงเฉือน ซึ่งผลสรุปของการทดสอบคือส่วนเบสของวัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์ไม่มีคุณสมบัตินิวโทเนียน โดยมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วแรงเฉือนลดลง ซึ่งทินเนอร์ที่ผสมลงไปไม่ได้มีผลมากนักต่อคุณสมบัตินี้ นอกจากนี้เขายังได้ทำการทดสอบถึงคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของวัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์อีกด้วย โดยทำการ

พิจารณาที่ช่วงอุณหภูมิ 25-50°C โดยใช้เครื่องมือทอร์ชันนอลเพนดูลัม (torsional pendulum apparatus) และทดสอบทั้งวัสดุที่มีและไม่มีอินเนอร์ผสม ผลสรุปว่าวัสดุพิมพ์ปากโพลีอีเธอร์เป็นวัสดุพิมพ์ปากที่มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ชนิดอื่นทำให้ยากต่อการดึงออกจากช่องปาก แต่เมื่อมีการผสมอินเนอร์ลงไปจะทำให้ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลงโดยไม่สูญเสียคุณสมบัติการยืดหยุ่นไป

ตารางต่อไปนี้เป็น การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากโพลีอีเธอร์, ซิลิโคน และโพลีซิลไฟด์มีค่ามากขึ้นตามลำดับ ส่วนการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของซิลิโคนมีค่าน้อยที่สุด และวัสดุโพลีซิลไฟด์มีค่าการไหลแฉและการโค้งงอมากที่สุด

| Material    | Physical properties |                  |                                  | Mechanical properties     |          |                 |
|-------------|---------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------|----------|-----------------|
|             | working time (min)  | consistency (mm) | dimensional stability 24 hr. (%) | permanent deformation (%) | flow (%) | flexibility (%) |
| polysulfide |                     |                  |                                  |                           |          |                 |
| light       | 7                   | 39               | -0.13                            | 2.7                       | 0.9      | 10              |
| regular     | 5                   | 33               | -0.25                            | 2.1                       | 0.5      | 7               |
| heavy       | 5                   | 28               | -0.22                            | 3.0                       | 0.3      | 5               |
| silicone    |                     |                  |                                  |                           |          |                 |
| light       | 4                   | 35               | -0.52                            | 0.9                       | 0.1      | 7               |
| regular     | 3                   | 28               | -0.58                            | 0.5                       | 0.09     | 5               |
| heavy       | 3                   | 24               | -0.58                            | 0.4                       | 0.09     | 4               |
| putty       | -                   | 14               | -0.28                            | 2.2                       | 0.07     | 2               |
| polyether   |                     |                  |                                  |                           |          |                 |
| regular     | 2                   | 27               | -0.30                            | 1.1                       | 0.03     | 2               |

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุพิมพ์ปากชนิดโพลีซิลไฟด์, ซิลิโคน และโพลีอีเธอร์ (Craig และคณะ 1975)

## การศึกษาความหนืดและระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปาก

การศึกษาของ MaCabe และ Bowman (1981) ถึงคุณสมบัติรีโอโลยีของวัสดุพิมพ์ปากชนิดต่างๆ คืออัลจินเนต, พลาสเตอร์สำหรับพิมพ์ปาก, คอมปาวด์สำหรับพิมพ์ปาก, ซิงค์ออกไซด์ยูจินอล, โพลีซิลไฟด์, ซิลิโคน และ โพลีอีเธอร์ โดยการใช้เครื่องมือวัดความหนืดเอกทรูชัน (extrusion rheometer), เครื่องมือวัดความหนืดรีซิโพรเคต (reciprocating rheometer), และ เครื่องมือวัดความหนืดแผ่นขนาน (parallel plate viscometer) ผลการทดลองพบว่าวัสดุพิมพ์ปากทั้งหมดที่นำมาทดลองมีคุณสมบัติวัสดุพลาสติกซึ่งมีความหนืดลดลงเมื่ออัตราเร็วแรงเฉือนเพิ่มขึ้น

มีการศึกษาถึงความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ 12 ชนิด โดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลต และทดสอบที่อัตราเร็วแรงเฉือนต่างๆ กัน โดยอัตราเร็วแรงเฉือนที่เลือกใช้จะเป็นตัวแทนของอัตราเร็วแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในขณะทำงานในชีวิตประจำวัน คืออัตราเร็วแรงเฉือนในขณะผสมวัสดุพิมพ์ปากซึ่งมีค่าประมาณ  $20-30$  วินาที<sup>-1</sup>, อัตราเร็วแรงเฉือนในขณะฉีดออกจากกระบอกฉีดมีค่าประมาณ  $1,000$  วินาที<sup>-1</sup> และอัตราเร็วแรงเฉือนในขณะกดถาดพิมพ์ปากลงในปากมีค่า  $1$  วินาที<sup>-1</sup> ผลการทดลองพบว่าวัสดุพิมพ์ปากทั้งหมดที่นำมาทดสอบมีคุณสมบัติความบางเมื่อได้รับแรงเฉือน นอกจากนี้เขายังพบว่าวัสดุพิมพ์ปากชนิดซิลิโคนมีความหนืดต่ำกว่าโพลีซิลไฟด์และโพลีอีเธอร์ (Herfort และคณะ 1977) จากการศึกษาของ Jamani และคณะ โดยใช้คอมพรีโอมิเตอร์ (Compheometer) ซึ่งเขาและเพื่อนได้เป็นผู้คิดค้นขึ้นมาสรุปได้ว่า สามารถแบ่งลักษณะความชื้นของเนื้อวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ออกได้ดังนี้ ชนิดโพลีเอทิลีนมีค่าความหนืดต่ำกว่า  $1700$  นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร, เรกูลาร์บอดี  $1200-3000$  นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร, เฮฟวีบอดี  $2200-5200$  นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร และชนิดพีดีมีมากกว่า  $5200$  นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร จะเห็นว่าการซ้อนทับกันในแต่ละช่วงของชนิดวัสดุ เนื่องจากว่าไม่สามารถกำหนดค่าของความหนืดได้อย่างแม่นยำนัก (Jamani, Harrington และ Wilson 1989a)

การศึกษาอีกชิ้นหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากหลายๆ ชนิดด้วยเครื่องมือวัดความหนืดโรเตชัน ซึ่งได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับการทดลองข้างต้นคือ ความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากเกือบทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่จากการทดลองนี้พบว่าวัสดุพิมพ์ปากซิงค์ออกไซด์ยูจินอลไม่มีพฤติกรรมดังกล่าว (Koran 1977)

อีกการศึกษาหนึ่งเกี่ยวกับความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ แต่มีจุดที่ศึกษาแตกต่างกันคือหาผลของความหนืดที่มีต่อความเที่ยงตรงและความมีเสถียรภาพ (stability) ของวัสดุ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของความเที่ยงตรงและความมีเสถียรภาพไม่มีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุที่มีความหนืดสูงกับวัสดุที่มีความหนืดต่ำ ส่วนการมีอัตราเร็วการแข็งตัวที่เร็ว

ของซิลิโคนและอะการจะทำให้ความเที่ยงตรงและความมีเสถียรภาพลดลง เนื่องจากมีความเครียดตกค้างอยู่ภายในตัววัสดุ (Reisbick 1971)

นอกจากมีการศึกษาผลของความหนืดที่มีต่อความเที่ยงตรงและความมีเสถียรภาพของวัสดุพิมพ์ปากแล้ว ยังมีการศึกษาอีกชิ้นหนึ่งที่ศึกษาถึงผลของความหนืดและความชอบน้ำ (hydrophilicity) ที่มีต่อความสามารถของวัสดุพิมพ์ปากในการไล่น้ำ (water displacing ability) ออกจากผิวเนื้อฟัน (dentin) ซึ่งทำโดย Peutzfeldt และ Asmussen ในปี 1988 พบว่ายิ่งวัสดุมีคุณสมบัติชอบน้ำสูง หรือมีมุมสัมผัสน้อยกว่า  $70^\circ$  จะยังมีความสามารถในการไล่น้ำสูงตามไปด้วย ส่วนวัสดุที่มีความหนืดสูงและวัสดุที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก็จะมีความสามารถในการไล่น้ำสูงเช่นกัน

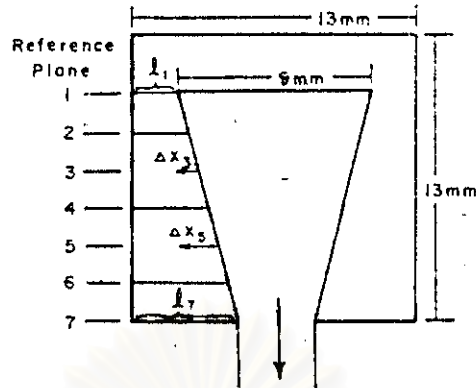
Stannard และ Craig ในปี 1979 ได้ทำการทดลองหาวิธีเปลี่ยนแปลงอัตราการแข่งขันตัวของวัสดุพิมพ์ปากแอดดิชันซิลิโคน โดยการเติมสารที่มีโมเลกุลเป็นทริปเปิลบอนด์ (triple bond) เพื่อหวังอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน เขาได้เลือกกรดฟีนิลโพรพิโออิก (phenylpropilic acid / P.P.A.) ซึ่งมีลักษณะของโมเลกุลที่เป็นทริปเปิลบอนด์และเป็นสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองที่น้อยที่สุด โดยใช้ปริมาณของ P.P.A. ต่างๆ กันเติมลงในวัสดุพิมพ์ปากที่มีอัตราส่วนของส่วนเบสต่อส่วนเร่งปฏิกิริยาเป็น 1 ต่อ 1 ปริมาณ 20 กรัม แล้วติดตามดูความหนืด จากการวัดความหนืดพบว่าค่าสูงสุดคือ  $12.5 \times 10^5$  cp ก่อนที่วัสดุจะแข็งตัว และใช้ปริมาณของ P.P.A. เพียงเล็กน้อยเท่านั้นในการทำให้อัตราของปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันลดลง และพบว่าถ้าปริมาณของ P.P.A. มากเกินไปวัสดุอาจไม่มีการแข็งตัวเลย ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือ เปลี่ยนอัตราส่วนของส่วนเบสต่อส่วนเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนอัตราการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน และวัดความหนืดเมื่อเวลาผ่านไปของวัสดุที่มีอัตราส่วน 0.25/1, 1/1, 2/1, 3/1, และ 6/1 ของส่วนเร่งปฏิกิริยา/ส่วนเบส พบว่าอัตราเร็วของการแข็งตัวของวัสดุจะไม่แน่นอนโดยดูจากการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่วัดได้ ในอัตราส่วนเบสต่อส่วนเร่งปฏิกิริยา 3 ต่อ 1 จะมีระยะเวลาการแข็งตัวลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของส่วนเร่งปฏิกิริยาต่อส่วนเบสจะเพิ่มเวลาก่อนการแข็งตัวของวัสดุ และพบว่าอัตราส่วนของส่วนเบสต่อส่วนเร่งปฏิกิริยาที่เท่ากับ 1 ต่อ 2 จะให้ระยะเวลาการแข็งตัวที่ดีกว่าการเติม P.P.A. ลงไปในวัสดุ

ในการทดสอบความยืดหยุ่นของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์จำเป็นที่จะต้องมีการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนืดคือ อุณหภูมิของวัสดุขณะแข็งตัว, ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากได้รับความเครียดในระหว่างดึงวัสดุออกจากปาก และความหนาของวัสดุสำหรับฉีด (syringe material) ผลสรุปในเรื่องของอุณหภูมิ แนะนำว่าควรใช้ช่วงอุณหภูมิต่ำ (low temperature range) คือ  $30-31^\circ\text{C}$  ส่วนเวลาที่ใช้ในการดึงวัสดุออกจากปากซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความเครียดเกิดขึ้นต่อวัสดุพิมพ์ปากและมีผลต่อการคืนกลับ พบว่าควรใช้เวลาประมาณ 6 วินาที ส่วนการศึกษาถึงความหนาของวัสดุสำหรับฉีดจะทำโดยฉีควัสดุออกในบริเวณที่ต้องการลอกรายละเอียดพบว่าวัสดุชนิดเซฟวิบอดี้จะใส่วัสดุชนิดไลท์บอดี้

ออกจนเหลือเพียงชั้นบางๆ สำหรับพื้นที่ได้รับการกรอแต่งเพียงรอบนอก (extracoronal preparation) จะมีความหนาของวัสดุสำหรับฉีดยึด ประมาณ 0.0-0.15 มม. และสำหรับพื้นที่ได้รับการกรอแต่งเข้าไปในตัวฟัน (intracoronal preparation) วัสดุมีความหนาถึง 1 มม. ซึ่งอยู่บริเวณมุมด้านใน (internal point angles) สรุปได้ว่าความยืดหยุ่นของวัสดุพิมพ์ปากจะได้จากวัสดุชนิดเซฟวิบอดีมากกว่าวัสดุสำหรับฉีดยึดซึ่งอาจให้เพียงแค่ลักษณะภายนอกของพื้นผิว (surface texture) เท่านั้น (Blomberg และคณะ 1992)

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของลักษณะวัสดุอีลาสติกคือการคืนกลับ ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการคืนกลับเช่นกันซึ่งทำโดย Jamani และคณะในปี 1989 เขาได้กล่าวไว้ว่าวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ควรจะมีการคืนกลับที่มากเพียงพอหลังจากดึงผ่านบริเวณที่เป็นส่วนคอคอด การทดสอบทำโดยให้ชิ้นทดสอบได้รับแรงกด (compressive stress) หรือแรงดึง (tensile stress) เป็นเวลาหลายๆ ครั้งหลังจากแข็งตัว ซึ่งการทดสอบแบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้ 1. ทาปริมาณของความเครียดเฉือน (shear strain) ที่ไม่เข้าไป 2. เวลาที่ให้ ความเครียด 1 นาที หลังแข็งตัว 3. ความหนาของชิ้นทดสอบ 1 มม. หรือ 2 มม. และ 4. การทดสอบพรีไดนามิก (Pre-dynamic testing) คือให้มีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของเครื่องมือก่อนใส่ความเครียดให้แก่ชิ้นทดสอบ ผลการทดสอบสรุปได้ว่า 1. ยิ่งวัสดุได้รับความเครียดเฉือนมาก จะยังมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรมากหรือมีการคืนกลับน้อย, 2. เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไป การคืนกลับจะดีขึ้น, 3. ความยืดหยุ่นขึ้นกับความหนาของชิ้นทดสอบ พบว่าเมื่อให้ความเครียดเฉือนที่เท่ากัน ชิ้นทดสอบที่มีความหนา 1 มม. จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรมากกว่า 2 มม. และ 4. ในการทดสอบพรีไดนามิกไม่มีผลต่อการคืนกลับและพบว่าไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรกับความหนืดในช่วงต้นของวัสดุอีลาสโตเมอร์ นอกจากนี้เขายังแนะนำว่าควรทิ้งวัสดุพิมพ์ปากไว้ในปากให้นานเกินระยะเวลาการแข็งตัวไปประมาณ 2 นาที เพื่อลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรให้มีค่าน้อยลง

ในปี 1972 Lautenschlager และคณะได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับการคืนกลับของวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์จาก 2 บริษัท โดยใช้วัสดุ 3 แบบคือเซฟวิ, เรกูลาร์ และไลท์บอดี โดยการศึกษาของเขาได้ลอกเลียนการดึงผ่านส่วนคอคอดในช่องปากและมีเส้นอ้างอิง (reference plane) เป็นดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงแท่งอะคริลิกที่มีส่วนคอดและมีความเอียง  $14^\circ$  พร้อมเส้นอ้างอิงทั้ง 7

การทดสอบจะทำโดยการดึงแท่งอะคริลิกที่มีส่วนคอดที่มีความเอียง  $14^\circ$  ออกจากวัสดุที่แข็งตัวแล้วด้วยความเร็ว 5 และ 50 เซนติเมตรต่อวินาที การดึงแท่งอะคริลิกออกนั้นจะถูกถ่ายภาพไว้ในลักษณะรูปภาพที่มีการเคลื่อนไหว (motion picture) 64 รูปต่อวินาที ขนาดของรูปขยาย 25 เท่า หลังจากนั้นนำมาวัดความยาวของเส้นอ้างอิงทั้ง 7 เส้นไว้ทุกๆ  $1/64$  วินาที จะสามารถนำมาหาค่าความเครียดทางวิศวกรรม (engineering strain ( $e$ )) ได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$e = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลง dimension}}{\text{dimension เดิม}} = \frac{\Delta x}{l_n}$$

ผลการทดลองสรุปได้ว่าความแข็งตรงหรือความเค้นที่เพิ่มขึ้นต่อความเครียด 1 หน่วยจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเร็วของการดึง และอัตราเร็วของการคลายความเค้น (stress relaxation) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน การคืนกลับสู่รูปร่างเดิมของวัสดุพิมพ์ปากจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วและปริมาณของความเครียดในขณะดึงผ่านส่วนคอด และพบว่าวัสดุพิมพ์ปากโพลีเอทิลีนจะมีการคืนกลับสู่รูปร่างเดิมในทันทีที่เริ่มดึง และหลังจากนั้นก็เกิดการคืนกลับต่อไปอีกเมื่อดึงวัสดุพ้นจากส่วนคอดแล้ว

อีกการศึกษาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของวัสดุพิมพ์ปากแอตติชันซิลิโคน โดยใช้การทดสอบความคืบ (creep tests) ตรวจวัดความเบี่ยงเบน (deflection) ของชิ้นทดสอบภายใต้แรง 0.5 และ 1 กิโลกรัม โดยเป็นฟังก์ชันของเวลา นำมาคำนวณหาค่าความคืบ (creep compliance) ในขณะรับแรง แล้วจึงนำมาเขียนกราฟระหว่างความคืบ (creep compliance) กับเวลาของแรงทั้ง 0.5 และ 1 กก. โดยที่ความชันมีค่าเท่ากับ  $1/n$  หลังจากให้แรงไปเป็นเวลา 3 นาทีวัสดุมีความชันใกล้เคียงกับ 0 แสดงว่ามีการตอบสนองแบบมีความหนืดเพียงเล็กน้อย (minimal viscous response) และสรุปได้ว่าคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของวัสดุไม่ขึ้นกับแรงที่ได้รับ (Yeh และคณะ 1980)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุพิมพ์ปากโพลีซัลไฟด์ โดยการสร้างสภาวะต่างๆ ดังนี้ ผสมโพลีซัลไฟด์เหลว (liquid polysulfide) 2 ชนิดที่ทราบน้ำหนักโมเลกุล (1,000+4,000) เข้าด้วยกัน โดยเปลี่ยนอัตราส่วนในการผสมเพื่อดูความหนืดในแต่ละอุณหภูมิ ผลปรากฏว่า เมื่อใช้โพลีซัลไฟด์เหลวชนิดอินเทอร์มีเดียตคอนเดนเซชัน (liquid polysulfide intermediate condensation product) ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 4,000 ในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะทำให้ความหนืดสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองนั้น จะทำให้ความหนืดลดลง (Higashi และคณะ 1971a) ต่อมาทดลองผสมออกซิไดซิงเอเจนต์ (oxidizing agent) ของโพลีซัลไฟด์ 2 ชนิดคือ  $PbO_2/MnO_2$  ในอัตราส่วนต่างๆ กัน แล้ววัดหาความหนืด จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของ  $PbO_2/MnO_2$  คือ 1/3.2 (Higashi และคณะ 1971b) อีกการทดลองหนึ่งเกี่ยวกับฟิลเลอร์และพลาสติกไซเซออร์ชนิดต่างๆ กัน โดยฟิลเลอร์ที่ใช้ในการทดลองคือคาร์บอน (carbon), ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ), พลาสเตอร์ชนิดเซมิวอเตอร์ (semi-water plaster), ซิงค์ซัลไฟด์ ( $ZnS$ ) และไททาเนียม ไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ส่วนพลาสติกไซเซออร์ คือ ไดบิวทิลฟทาเลต (dibutylphthalate/D.B.P.), มอนซานโต เฮซบี 40 (monsanto HB 40) และแคสเตอร์ออยล์ (caster oil) ผลการทดลองพบว่าฟิลเลอร์ที่สามารถนำมาใช้ได้คือซิลิคอนไดออกไซด์, พลาสเตอร์ชนิดเซมิวอเตอร์, และซิงค์ซัลไฟด์ ส่วนพลาสติกไซเซออร์คือ D.B.P., มอนซานโต เฮซบี 40, และแคสเตอร์ออยล์ (Higashi และคณะ 1971c)

ในปี 1978 Combe และ Moser ได้เปรียบเทียบลักษณะทางรีโอโลยีของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์โดยไม่ผสม เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือเครื่องมือวัดความหนืดชนิดแคปิลลารีเอกซทรูชัน (capillary extrusion rheometer) และวัสดุที่ทดสอบคือโพลีซัลไฟด์ทั้งส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยา, โพลีเอเธอร์ทั้งส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยา, และซิลิโคนเฉพาะส่วนเบส การทดลองของเขาจะต้องมีการทดสอบแรงเสียดทานของเครื่องมือก่อนโดยทดสอบในเครื่องมือวัดความหนืดที่ไม่ใส่สารทดสอบที่ความเร็วทดสอบ (crosshead speed) ต่างๆ กัน หลังจากนั้นทดสอบกับวัสดุต่างๆ แล้วบันทึกแรงที่ใช้ดันวัสดุออกจากท่อแคปิลลารีที่อัตราเร็วแรงเฉือนต่างๆ กัน และนำมาคำนวณหาค่าความหนืด จากผลการทดลองสามารถสรุปค่าความหนืดแอฟฟาราเรนท์พอลส์ของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ที่  $65 \text{ วินาที}^{-1}$   $25^\circ\text{C}$  ได้ดังนี้ สำหรับวัสดุชนิดพดีตีมีความหนืด 4,000-7,000 ปัวส์, เฮฟวีบอดี 2,000-3,000 ปัวส์, เรกูลาร์บอดี 400-1,500 ปัวส์ และไลท์บอดีหรือวัสดุสำหรับพิมพ์ทับ 100-700 ปัวส์ และพบว่าส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีคุณสมบัติที่เรียกว่าความบางเมื่อได้รับแรงเฉือน มีเพียงส่วนเบสของโพลีซัลไฟด์ 2 ชนิดเท่านั้นที่แสดงคุณสมบัติความหนาเมื่อได้รับแรงเฉือน

วัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ชนิดมีความหนืดเดียวเป็นวัสดุพิมพ์ปากที่ถูกผลิตออกมากเพื่อใช้กับทั้งถาดพิมพ์ปากและสำหรับใช้ฉีด โดยใช้หลักการพื้นฐานของคุณสมบัติความบางเมื่อได้รับแรงเฉือนหรือคุณสมบัติสุโตพลาสติก (Kim และคณะ 1992, Braden 1967, Herfort 1977, และ Craig 1989) ซึ่งวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้สามารถมีความหนืดที่มากเพียง

พอกที่จะคงอยู่ในภาคพิมพ์ปาก และมีความหนืดลดลงเมื่อใช้เป็นลักษณะฉีด ซึ่งจะมีคุณสมบัติของการไหลแผ่ดีขึ้น (Kim และคณะ 1992, และ Craig 1989)

Kim และคณะในปี 1992 ได้ทำการตรวจสอบคุณสมบัติความบางเมื่อได้รับแรงเฉือนของซิลิโคนชนิดความหนืดเดียว (monophase addition silicone) ทั้งชนิดผสมด้วยมือ (paste type) และชนิดผสมอัตโนมัติ (automixing type) ทั้งมีและไม่มีตัวหน่วงปฏิกิริยา โดยวัดความหนืดเมื่ออัตราเร็วแรงเฉือนต่างๆ กัน ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือเครื่องมือวัดความหนืดโรตารีชนิดมีพายรูปตัวที (T-bar spindle) การทดสอบแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ทดสอบความหนืดของส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยาของแต่ละวัสดุที่ความเร็วของการเคลื่อนพาย (spindle speed) 2.5 รอบต่อนาที (rpm) และอ่านค่าที่เวลา 10 นาทีหลังจากเครื่องมือเริ่มทำงานพบว่า ความหนืดของส่วนเบสและส่วนเร่งปฏิกิริยาของวัสดุส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน การทดสอบส่วนที่ 2 เป็นการวัดความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากที่ผสมโดยไม่มีตัวหน่วงปฏิกิริยา โดยวัดความหนืดที่เปลี่ยนไปตามเวลา ที่ 1 และ 1.5 นาทีหลังจากผสมเสร็จ โดยทดสอบที่ความเร็วของการเคลื่อนพาย 0.5 และ 2.5 รอบต่อนาที ผลการทดสอบสรุปว่า เมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของวัสดุจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันแต่ความเร็วของการเคลื่อนพายต่างกันจะพบว่า ที่ความเร็ว 2.5 รอบต่อนาทีมีความหนืดต่ำกว่า 0.5 รอบต่อนาที การทดสอบส่วนสุดท้ายเป็นการวัดความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากที่ผสมโดยมีตัวหน่วงปฏิกิริยาคือกรดทิตานิลพรพิโอติก ซึ่งมีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาของวัสดุแอดดิชันซิลิโคนคือกรดคลอโรพลาตินิก (chloroplatinic acid) แล้ววัดความหนืดที่เปลี่ยนไปตามความเร็วของการหมุนของเครื่องมือ 0.5, 1, 2.5, 5, และ 10 รอบต่อนาที และทำการบันทึกค่าความหนืดที่ 10 นาทีหลังเครื่องมือเริ่มทำงาน ผลการทดสอบพบว่า ความหนืดของวัสดุทั้งหมดลดลงเมื่อความเร็วของการหมุนของเครื่องมือเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติยูโดพลาสติกหรือมีความบางเมื่อได้รับแรงเฉือน

นอกจากพบว่าวัสดุพิมพ์ปากทั้งผสมและไม่ผสมมีคุณสมบัติยูโดพลาสติกแล้วยังมีการศึกษาที่ได้ผลในทางตรงข้ามคือ ไม่เสมอไปที่เมื่อเพิ่มอัตราเร็วแรงเฉือนแล้วความหนืดของวัสดุเหล่านั้นจะลดลง เช่นการศึกษาของ Vermilyea, Hugot และ Simon (1980) พบว่ามีซิลิโคนอยู่ 1 ชนิดที่เป็นวัสดุโกลาแดนท์ และในปี 1994 การศึกษาของ Chal และ Pang ได้ทดสอบในวัสดุพิมพ์ปากชนิดต่างๆ คือ ซิลิโคน, โพลีอีเทอร์, และโพลีซิลไฟด์ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกมีการฉีดวัสดุพิมพ์ปากที่ผสมแล้วผ่านกระบอกลดความดัน ส่วนกลุ่มที่ 2 ไม่มีการฉีดผ่าน กระบอกลดความดัน การทดสอบใช้เครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลต โดยผสมวัสดุภายใน 15 วินาที และใส่วัสดุลงในเครื่องมือหลังจากผสม 25 วินาที หลังจากนั้นทดสอบหาความหนืดแอมพารนที่เวลา 60 วินาทีหลังจากผสม และนำผลของทั้ง 2 กลุ่มมาเปรียบเทียบกัน ผลการทดลองของเขาสรุปว่าแรงเฉือนที่เกิดจากการฉีดผ่านกระบอกลดความดันของวัสดุทั้งหมดไม่ได้มีผลต่อความหนืดของวัสดุเลย เมื่อวัดที่เวลา 60 วินาทีหลังจากผสม ซึ่งเวลา 60 วินาทีนี้แทนเวลาที่ใส่ภาคพิมพ์ปากเข้าปากและฉีดวัสดุพิมพ์ปากเข้าในปาก



อีกการศึกษาหนึ่งที่ให้ผลการทดลองขัดแย้งเช่นกัน โดยทำการทดสอบในวัสดุจำพวกซิลิโคน 10 ชนิด โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกับการทดสอบข้างต้น (Chai และ Pang 1994) และทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดความหนืดโคนและเพลต โดยเขาสรุปว่าแรงเฉือนไม่ได้มีผลที่แน่นอนต่อความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากที่นำมาทดสอบ นอกจากนี้เขายังพบว่าวัสดุพิมพ์ปากบางตัวมีคุณสมบัติไดลาแตนท์ซึ่งมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเร็วแรงเฉือน ซึ่งกลไกของคุณสมบัติไดลาแตนท์ของโหล่นี้สามารถอธิบายได้โดยปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่มีอยู่ในของโหลนั้น ซึ่งการมีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่มากเพียงพอจะไปแทรกอยู่ระหว่างพาร์ติเคิล (particles) ที่อัดกันอยู่แน่นทำให้การไหลแผ่ดีขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเร็วแรงเฉือนขึ้นพาร์ติเคิลเหล่านั้นจะคลายตัวออกจากกันและมีการดันซึ่งกันและกัน ผลคือทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สามารถชดเชยได้ด้วยการใส่พลาสติกไซเซอร์ปริมาณเล็กน้อย (Pang และ Chai 1994)

ความหนืดของวัสดุเมื่อเวลา 45 วินาทีหลังจากเริ่มผสมแสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

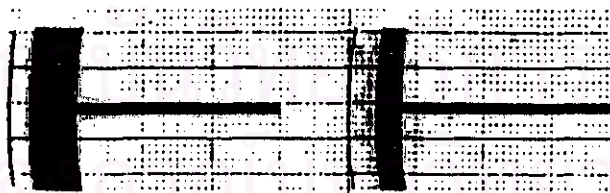
| <i>Material</i> |                     | <i>viscosity 45 seconds after mixing</i><br>(cp) |
|-----------------|---------------------|--|
| Polysulfide     | low                 | 60,000   |
|                 | medium              | 110,000  |
|                 | high                | 450,000  |
| Silicone        |                     |  |
| condensation    | low                 | 70,000   |
|                 | very high           |  |
| addition        | low                 | 150,000  |
|                 | medium              |  |
|                 | high                |  |
|                 | very high           |  |
| Polyether       | low                 | 130,000  |
|                 | medium              |  |
|                 | medium plus thinner |  |
|                 | high                |  |

ตารางที่ 3 แสดงค่าประมาณของความหนืดของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ชนิดต่างๆ (ดัดแปลงจาก Craig 1989)

จะเห็นได้ว่าความหนืดของวัสดุเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุจากต่ำไปสูงในวัสดุชนิดเดียวกัน ในวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนและโพลีเอเธอร์จะมีการเพิ่มขึ้นของความหนืดอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป แต่โพลีเอเธอร์มีการเพิ่มขึ้นที่รวดเร็วกว่า ดังนั้นจึงควรพิมพ์ปากเข้าสู่ปากผู้ป่วยในเวลาที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้คุณสมบัติของวัสดุที่ดีที่สุด (Craig 1989)

วัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนและโพลีเอเธอร์มีกลไกการแข็งตัว (setting mechanism) ที่คล้ายคลึงกันคือ เริ่มจากการที่โพลีเมอร์เหลว (liquid polymer) ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้สายโซ่โพลีเมอร์ (polymer chain) ที่สั้นลงและขนาดใหญ่ขึ้น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเหล่านี้จะเกิดควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีคือ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นและในที่สุดจากสถานะที่เป็นของไหลก็จะเข้าสู่สถานะของแข็งคล้ายยาง (elastic solid) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของวัสดุที่มีการแข็งตัวเช่นนี้จะสามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของวัสดุเมื่อเวลาผ่านไปเมื่อเป็นของไหล โดยที่จะสามารถหาเวลาในการทำงาน (working time) ได้โดยหาเวลาที่วัสดุเริ่มแข็งตัว (initial set) และเวลาการแข็งตัวของวัสดุ (setting time) จะเท่ากับเวลาที่วัสดุมีการแข็งตัวเต็มที่ (final set)

กลไกการแข็งตัวของวัสดุในอุดมคติ (ideal material) จะมีลักษณะของความหนืดคงที่อยู่ช่วงเวลาหนึ่ง และหลังจากนั้นจะมีการเพิ่มความหนืดขึ้นอย่างรวดเร็วกลายเป็นของแข็ง ซึ่งในกรณีนี้ช่วงเวลาการแข็งตัว (setting range) จะมีค่าเป็น 0 (ช่วงเวลาการแข็งตัวมีค่าเท่ากับช่วงเวลาระหว่างเวลาที่วัสดุเริ่มมีการแข็งตัวและเวลาที่วัสดุมีการแข็งตัวเต็มที่) และแผนภาพที่ได้จากการทดสอบโดยเครื่องมือวัดความหนืดรีโอโรเคตจะเป็นดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงลักษณะการแข็งตัวของวัสดุในอุดมคติ บริเวณแถบกว้างแสดงถึงวัสดุมีความหนืดต่ำและบริเวณแถบแคบแสดงว่าวัสดุมีความหนืดสูง

แต่ในความเป็นจริงวัสดุพิมพ์ปากที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะค่อยๆ มีการแข็งตัว และพบว่าวัสดุพิมพ์ปากโพลีเอเธอร์ ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าซิลิโคน ซึ่งแผนภาพที่ได้จากวัสดุเหล่านี้จะเป็นในลักษณะต่อไปนี้



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปากตามความเป็นจริง ซึ่งแถบกว้างแสดงถึงวัสดุที่มีความหนืดต่ำและแถบแคบแสดงว่ามีความหนืดสูง

โดยที่เวลาในการทำงานในรูปที่ 10 จะเป็นช่วงเวลาที่ความกว้างของเส้นทั้งสองมีค่าประมาณ 95% ของความกว้างในขณะใส่วัสดุเข้าเครื่องทดสอบ ส่วนเวลาการแข็งตัวของวัสดุจะเป็นเวลาที่เส้นทั้งสองเริ่มขนานกันอีกครั้งหนึ่ง (Wilson 1966b)

วัสดุพิมพ์ปากที่จะถือว่ามีลักษณะการแข็งตัวที่เหมาะสม จะต้องประกอบด้วย

1. มีเวลาการทำงานที่นานเพียงพอเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้องปกติ
2. หลังจากนั้นมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อนำเข้าสู่ช่องปาก (Wilson 1966b)

สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ปากคือ อุณหภูมิที่วัสดุจะได้รับเมื่ออยู่ในช่องปาก ซึ่งจากข้อกำหนดที่ 19 ของ ADA สำหรับวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ชนิดนอนเอเคลริสได้กำหนดได้ว่า อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันของวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้มีค่า  $32^{\circ}\text{C}$  แต่ได้มีผู้ทำการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ  $32^{\circ}\text{C}$  นี้วัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์จะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์และอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อใช้อุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$  ในการทดสอบผลจะแตกต่างกัน คือสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์และอย่างสม่ำเสมอด้วย แต่อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะสูง ดังนั้นเขาจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับวัสดุพิมพ์ปากชนิดนี้ โดยใช้การวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลาพบว่าอุณหภูมิของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ที่อยู่ในช่องปากนานเป็นเวลา 4.5 นาที จะมีค่า  $35.3^{\circ}\text{C}$  (Sandrik และ Sama 1980) ต่อมาในปี 1988 Jamini และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุพิมพ์ปากชนิดแอคติวชันซิลิโคนและอัลจินेटในขณะที่อยู่ในช่องปาก พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยขณะอยู่ในช่องปากคือ  $33.1^{\circ}\text{C}$  และเขาได้แนะนำว่าช่วงของอุณหภูมิที่ควรใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุพิมพ์ปากนี้คือ  $33.0 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุส่วนที่อยู่ห่างจากเนื้อเยื่อ 0.5 มม. จะมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่ห่างจากเนื้อเยื่อ 2 มม. ไม่ว่าจะใช้วัสดุพิมพ์ปากที่ทำด้วยอะคริลิก

เรซินหรือโลหะก็ตาม ซึ่งเขากล่าวว่าอุณหภูมิของส่วนต่างๆ ของวัสดุและธาตุพิมพ์ปากจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยคือ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อในช่องปาก, ความสามารถในการนำความร้อน (thermal conductivity) และความสามารถในการเก็บความร้อน (heat capacity) ของวัสดุพิมพ์ปากและวัสดุที่ใช้ทำธาตุพิมพ์ปาก, ความหนาของวัสดุพิมพ์ปากและธาตุพิมพ์ปาก และเวลาที่ใส่วัสดุเข้าในปาก

ในปี 1965 Elborn และ Wilson ได้ทำการวัดอุณหภูมิของวัสดุพิมพ์ปากชนิดต่างๆ ที่เวลา 4 นาที และ 6 นาทีหลังจากเริ่มผสม เหตุผลที่เขาใช้เวลาเหล่านี้คือ เป็นช่วงเวลาที่ใช้ดึงวัสดุออกจากปากและเป็นช่วงเวลาที่ จะทำการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุ พบว่าระหว่างเวลา 4 และ 6 นาที อุณหภูมิของวัสดุจะไม่แตกต่างกันมากนักเกินกว่า  $0.5^{\circ}\text{C}$  โดยช่วงอุณหภูมิของวัสดุที่เวลา 4 นาทีหลังจากเริ่มผสมมีดังนี้คือวัสดุอีลาสโตเมอร์มีช่วงอุณหภูมิ  $30.3-31.2^{\circ}\text{C}$ , อีลิจินด์  $28.2-29^{\circ}\text{C}$  และพลาสติกสำหรับพิมพ์ปาก  $31.1-32.4^{\circ}\text{C}$  ส่วนที่เวลา 6 นาทีมีค่าดังนี้ วัสดุอีลาสโตเมอร์  $31.2-32.1^{\circ}\text{C}$ , อีลิจินด์  $29.7-30^{\circ}\text{C}$  และพลาสติกสำหรับพิมพ์ปาก  $35.3-36.9^{\circ}\text{C}$

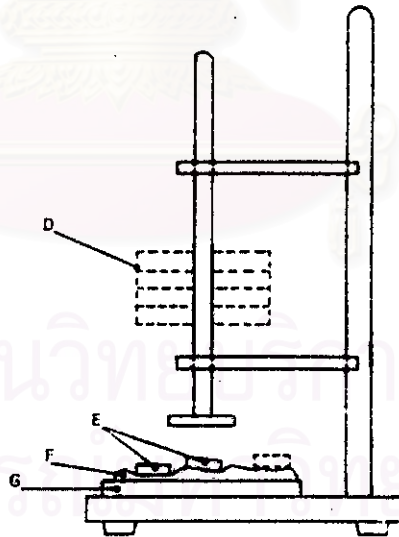
ในปี 1964 Wilson ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับลักษณะการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปากชนิดต่างๆ และได้สรุปเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ควรใช้ในการทดสอบวัสดุเหล่านี้ว่าควรจะเป็นอุณหภูมิ  $33^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะให้ผลที่เป็นจริงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อวัสดุอยู่ในช่องปาก นอกจากนี้ยังได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่าง (pH) ของอีลิจินด์ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองอย่างเกิดขึ้นในระหว่างที่อีลิจินด์กำลังแข็งตัว อุณหภูมิตอนเริ่มแรกจะลดลงและหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับกลไกการแข็งตัวในขณะที่อีลิจินด์เปลี่ยนสภาพจากโซลเป็นเจลจะมีความร้อนถูกปล่อยออกมา เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดคายความร้อน (exothermic chemical reaction) ส่วนความเป็นกรดต่างจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในขณะที่เริ่มผสมและช้าลงเมื่อปฏิกิริยาเริ่มสมบูรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะไปในทิศทางที่เป็นกรดมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรดต่างสามารถอธิบายได้โดยเปอร์เซ็นต์ของแคลเซียมซัลเฟต (calcium sulfate), เกลืออีลิจินด์ (alginate salt) และแคลเซียมซัลเฟตในรูปแบบคริสตัลที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการละลาย (solubility) ของวัสดุนั้นๆ สรุปได้ว่าแม้ว่าจะพบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเป็นกรดต่างของอีลิจินด์ต่างๆ ชนิดกัน แต่ความสัมพันธ์นี้ก็มีความหลากหลายมากเกินไปที่จะนำมาสรุปได้ ซึ่งข้อเท็จจริงนี้สนับสนุนทฤษฎีที่ว่าความแตกต่างของส่วนประกอบของอีลิจินด์จะเป็นตัวกำหนดกลไกการแข็งตัวที่แตกต่างกัน (Anastassiadou, Dolopoulou, และ Kaloyannides 1995a) นอกจากนี้จากการศึกษาข้างต้นแล้ว เขายังได้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่างกับความมีเสถียรภาพทางมิติของอีลิจินด์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงมิติที่ทำการศึกษาแบ่งเป็น 2 ชนิดคือการเปลี่ยนแปลงมิติในแนวเส้นตรง (linear dimensional change) และการเปลี่ยนแปลงมิติของวัสดุทั้งก้อน (mass dimensional change) โดยเขาสรุปว่าการ

เปลี่ยนแปลงของความเป็นกรดต่างมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเปลี่ยนแปลงทางมิติในแนวเส้นตรงและทั้งก่อน การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรดต่างเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างที่วัสดุแข็งตัว และพื้นฐานทางเคมีของวัสดุต่างชนิดกันจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงทางมิติให้มีค่าแตกต่างกันด้วย ซึ่งส่วนประกอบในโครงสร้างของเจลของอัลจิเนตที่แตกต่างกันที่นำมาใช้อธิบายผลการศึกษาครั้งนี้คือ เกลืออัลจิเนต, แคลเซียมซัลเฟต, เกลือฟอสเฟต และแคลเซียมซัลเฟตในรูปคริสตัล (Anasstasiadou, Dolopoulou และ Kaloyannides 1995b)

การที่จะทำได้ความเที่ยงตรงที่สูงจากการใช้วัสดุพิมพ์ปากชนิดต่างๆ กัน จะต้องใช้งานให้อยู่ภายในช่วงระยะเวลาการทำงานของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งวัสดุพิมพ์ปากในอุดมคติควรมีคุณสมบัติความเป็นพลาสติก (plasticity) ที่มากเพียงพอที่จะผสมหรือฉีดออกจากหลอด และสามารถไหลแผ่ไปตามผิวฟันได้อย่างง่ายดาย ความรู้เกี่ยวกับระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากจะทำให้สามารถเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับสภาวะทางคลินิกได้ โดยทั่วไปการหาระยะเวลาการทำงานมักจะทำทดสอบจากค่าความหนืดหรือความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นของวัสดุพิมพ์ปากที่ผสมแล้วด้วยเครื่องมือและหลักเกณฑ์ที่แตกต่างกันออกไป (Wilson 1966, และ McCabe และ Bowman 1981) ส่วนการหาระยะเวลาการทำงานตามวิธีของข้อกำหนดที่ 19 ของ ADA จะเป็นวิธีหาความหนาของชั้นทดสอบที่ถูกกด เมื่อความหนาของชั้นทดสอบที่ลดลงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.2 มม. หรือมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าที่เวลา 1.5 นาที จะนับเป็นระยะเวลาการทำงาน ของวัสดุนั้น (Council on Dental Materials and Devices 1997) นอกจากนี้มีการวัดระยะเวลาการทำงานจากการมีความสัมพันธ์กับความเที่ยงตรงทางมิติของตายที่ได้จากวัสดุพิมพ์ปากเหล่านั้น ซึ่งทำการทดสอบโดย Tan และคณะ ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาการทำงานที่หาได้จากวิธีนี้ไม่เท่ากับเวลาที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตใช้การหาระยะเวลาการทำงานจากค่าความยืดหยุ่นที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุพิมพ์ปากนั้นๆ แทน (Tan, Chai และ Wozniak 1995)

ต่อมาในปี 1996 Tan และเพื่อนกลุ่มเดิมได้ทำการหาระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากโพลีไวนิลซิลอกเซนที่สัมพันธ์กับความเที่ยงตรงทางมิติในลักษณะ 3 มิติด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดเทรเวล (travelling microscope) เป็นตัววัด ช่วงเวลาที่ทำการวัดแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ 1. 60 วินาทีก่อนระยะเวลาการทำงานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด 2. 30 วินาทีก่อนเวลาที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด และ 3. ที่ระยะเวลาการทำงานที่บริษัทกำหนด ผลการทดสอบสรุปได้เหมือนเดิมคือระยะเวลาการทำงานที่ได้จากการทดสอบมีค่าแตกต่างไปจากค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด โดยพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบมากกว่าประมาณ 30 วินาที ซึ่งผู้ทำการศึกษาได้กล่าวว่า วิธีการวัดระยะเวลาการทำงานเช่นนี้เป็นวิธีที่ใกล้เคียงกับสภาพทางคลินิกมากกว่าวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งวิธีการที่กำหนดไว้โดย ADA ด้วย (Tan, Chai, และ Wozniak 1996)

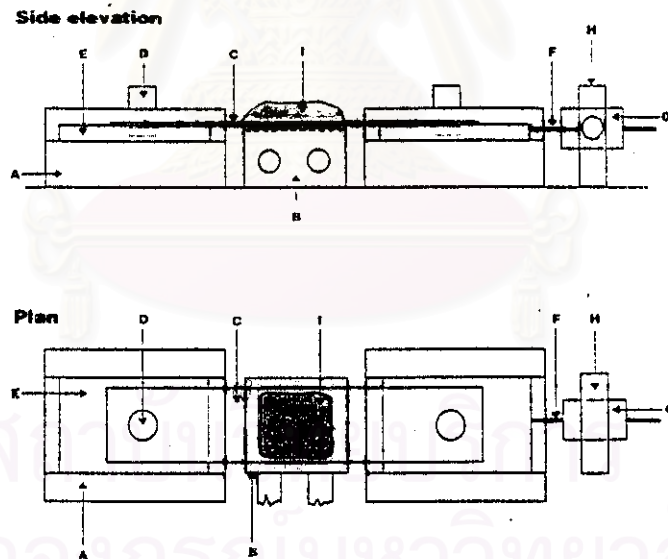
ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบเกี่ยวกับวิธีการหาระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ โดยใช้วิธีโซนแมกเกอร์ (Schoenmaker's method) และใช้เครื่องมือวัดความหนืดรีซิโพรเคด ซึ่งวิธีโซนแมกเกอร์เป็นวิธีที่หาระยะเวลาการทำงานจากความหนาของวัสดุพิมพ์ปากหลังผสมที่ถูกกดด้วยแรงค่าหนึ่ง ทุกๆ 30 วินาที โดยที่เมื่อความหนาของวัสดุพิมพ์ปากมีค่าเป็น 2 เท่าของความหนาแรกที่อ่านได้จะถือเป็นระยะเวลาการทำงานของวัสดุชิ้นส่วนระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปากซิลิโคนจะเป็นเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง 0.15 มม. ซึ่งเกิดจากแรงที่ใส่ลงไป สำหรับโพลีซิลไฟด์และโพลีอีเธอร์จะเป็นเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเท่ากับ 0.25 มม. ผลการเปรียบเทียบทั้งสองวิธีสรุปได้ว่าวิธีโซนแมกเกอร์ให้ค่าระยะเวลาการทำงานที่คงที่แต่มีความแตกต่างจากในทางคลินิกอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จะต้องทราบความหนืดช่วงต้นของวัสดุก่อนจึงจะสามารถเลือกแรงที่จะใส่ลงไปให้เหมาะสม, ต้องการความชำนาญของผู้ทดสอบและดูอย่างใกล้ชิดในขณะที่ทำการทดสอบ, และต้องใช้ปริมาณสารตัวอย่างที่มากอีกด้วย ส่วนการใช้เครื่องมือวัดความหนืดรีซิโพรเคดจะให้ค่าระยะเวลาการทำงานที่สัมพันธ์กับในทางคลินิก และการใช้เครื่องมือชนิดนี้ไม่ต้องการทราบค่าความหนืดหรือระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุก่อน, ใช้ความชำนาญของผู้ทำการทดสอบน้อย, บันทึกผลเป็นกราฟ, และใช้สารตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น (Mansfield, และ Wilson 1972)



รูปที่ 11 แสดงเครื่องมือสำหรับวัดระยะเวลาการทำงานโดยวิธีโซนแมกเกอร์

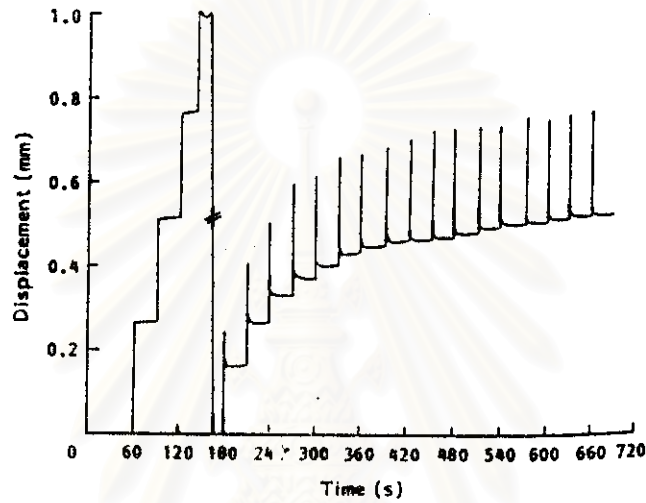
ได้มีผู้พยายามหาวิธีทดสอบระยะเวลาการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ขึ้นมาโดยอาศัยการดัดแปลงมาจากเครื่องมือวัดความหนืดรีซิโพรเคดที่อธิบายไว้โดย Wilson (1964) เรียกเครื่องมือชนิดนี้ว่าดิสเพลสเมนต์รีโอมิเตอร์ (displacement rheometer) เนื่องจากวัสดุพิมพ์ปากจะถูกดันเป็นช่วงๆ ในขณะที่เกิดการแข็งตัวโดยที่อุณหภูมิ

ที่ใช้หาระยะเวลาการทำงานคือ  $23^{\circ}\text{C}$  ส่วนระยะเวลาการแข็งตัวคือ  $37^{\circ}\text{C}$  ระยะเวลาการทำงานจะเป็นเวลาที่มีการคืนกลับช่วงแรก (initial elastic recovery) ของวัสดุที่ผสมแล้ว ที่  $23^{\circ}\text{C}$  และระยะเวลาการแข็งตัวเป็นเวลาที่มีวัสดุมีการคืนกลับคงที่ ผลการวัดจากเครื่องมือชนิดนี้จะนำมาเขียนกราฟระหว่างระยะทางที่วัสดุถูกทำให้เคลื่อนที่ไป (มม.) กับเวลา (วินาที) (รูปที่ 13) ชั้น (step) บนกราฟแทนการทำให้เกิดระยะทางที่เคลื่อนที่ของวัสดุเป็นระยะจนกระทั่งวัสดุแข็งตัว จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของกราฟไม่มีการคืนกลับเกิดขึ้นหลังจากนำความเค้นออก ในส่วนที่เป็นช่วงของการแข็งตัว (setting proceed) จะสามารถพบว่ามี การคืนกลับเกิดขึ้นบางส่วนและตามด้วยการคืนกลับปริมาณที่มากขึ้นจนกระทั่งแข็งตัว (Abuasi และคณะ 1993)

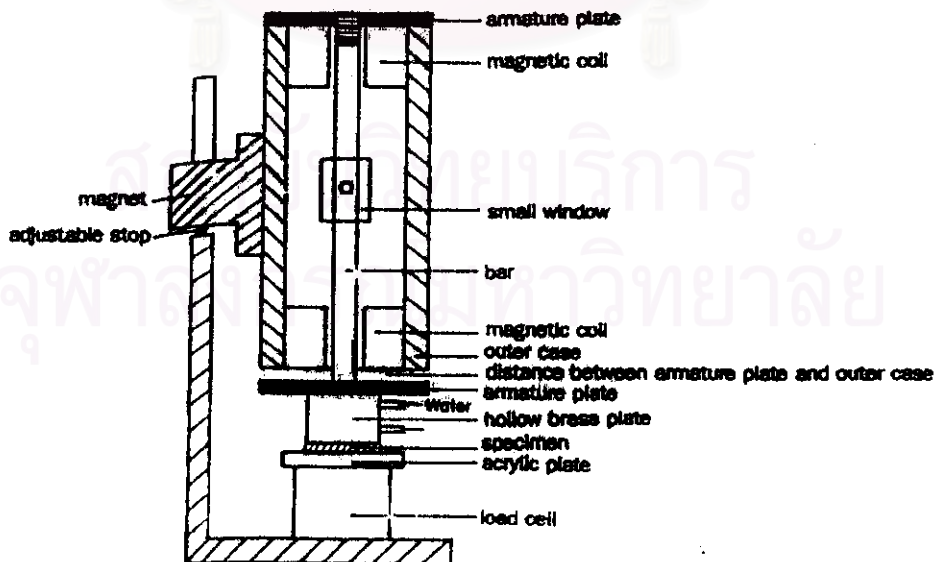


รูปที่ 12 แสดงไดอะแกรมของเครื่องมือวัดความเหน็ดดีสเพลสเมนต์ [A=แผ่นโลหะขัดมัน, B=กล่องโลหะสำหรับควบคุมอุณหภูมิ, C=แผ่นโลหะไรซินิมเจาะรู, D=หมุดสำหรับกำหนดตำแหน่งของแผ่นโลหะ, E=PTFE, F=ทรานสดิวเซอร์คอร์ (transducer core), G=ทรานสดิวเซอร์บอดี (transducer body), H=ตัวยึดทรานสดิวเซอร์ (transducer support), I=วัสดุพิมพ์ปาก]

ในปี 1989b Jamani, Harrington, และ Wilson ได้เสนอเครื่องมือวัดความหนืด, ระยะเวลาการทำงาน, และระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์ เรียกว่า คอมพิวเตอร์โอมิเตอร์ (รูปที่ 14) เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่บันทึกการเปลี่ยนแปลงรีโอโลยีของวัสดุที่ผสมแล้วและเป็นเครื่องมือที่ทำงานโดยใส่ความเครียดอัด (compressive strain) ไปยังวัสดุ และวัดความเค้นที่ออกมาโดยการบันทึกของคอมพิวเตอร์ซึ่งมีความเร็วมากกว่าการบันทึกด้วยปากกา (pen recorder) ที่ใช้เหมือนในเครื่องมือทั่วๆ ไป โดยลักษณะของลายเส้น (tracing) ที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 15 และ 16

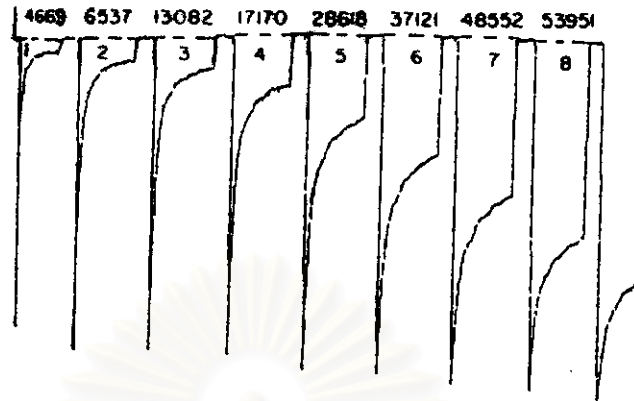


รูปที่ 13 แสดงกราฟระหว่างระยะทางที่วัสดุเคลื่อนที่ (displacement) และเวลา เมื่อทดสอบวัสดุพิมพ์ปากโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดดีสเพลสเมนต์ (Abuasi และคณะ 1993)

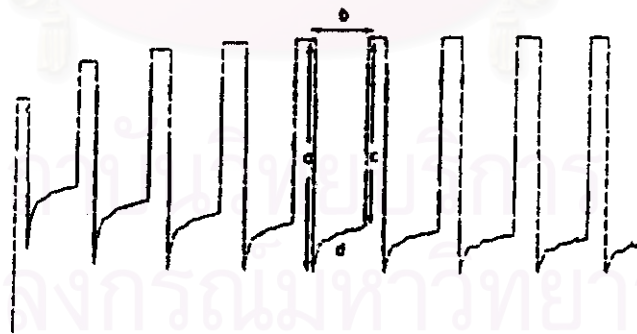


รูปที่ 14 แผนภาพแสดงเครื่องคอมพิวเตอร์โอมิเตอร์





รูปที่ 15 แสดงลักษณะการบันทึกความหนืดและระยะเวลาในการทำงานของวัสดุพิมพ์ปากชนิดพัตติจากคอมพิวเตอรื แกนนอนหมายถึงระยะเวลาในการทดสอบและแต่ละช่วงเวลาที่ให้ความเครียดอัดแก่วัสดุทุกๆ 15 วินาที แกนตั้งแสดงสัดส่วนของแรงที่เกิดขึ้นภายในตัววัสดุ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงที่ระน้อยซึ่งเป็นกาารเพิ่มขึ้นของความหนาของวัสดุ และตัวเลขที่อยู่ใต้เส้นบนเป็นตัวเลขแทนพื้นที่ใต้กราฟแต่ละส่วน เมื่อพื้นที่ใต้กราฟมีค่าเป็นสองเท่าของพื้นที่ใต้กราฟส่วนแรกจะถือว่าถึงเวลาในการทำงานของวัสดุแล้ว



รูปที่ 16 แสดงลักษณะการบันทึกเวลาการแข็งตัวของวัสดุพิมพ์ปากชนิดเรกูลาร์บอดี โดยที่ a และ c แทนแรงกดครั้งแรก (initial compression) ของการให้แรงในแต่ละครั้ง หลังจากที่ได้รับแรงกดแล้ววัสดุจะมีความล้า (yield(d)) เกิดขึ้น ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่าง a และ c และในขณะที่วัสดุเริ่มแข็งตัวจะมีความล้าลดลง ซึ่งลักษณะของสายเส้นจะมีลักษณะที่แบนลงจนกระทั่งคงที่ เมื่อนั้นจะถือว่าวัสดุนั้นแข็งตัวแล้ว

ผู้ทำการศึกษาได้กล่าวไว้ว่าเครื่องมือคอมพิวเตอร์สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยของความหนืดในระหว่างช่วงแรกของการแข็งตัว, สามารถวัดความหนืดได้หลายค่าที่เวลาใดก็ตามหลังจากผสมโดยใช้วัสดุทดสอบครั้งเดียว และสามารถวัดค่าของความหนืดในเชิงปริมาณได้ ค่าของระยะเวลาการทำงานที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์มีค่าน้อยกว่าค่าที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดมา ซึ่งเนื่องจากบริษัทพยายามบอกค่าระยะเวลาการทำงานที่สูง เพราะยิ่งวัสดุพิมพ์ปากมีระยะเวลาการทำงานที่นานก็จะยิ่งเป็นวัสดุที่ดีขึ้นเท่านั้น (Jamani, Harrington, และ Wilson 1989b)

ในปี 1986 Ohsawa และ Finger ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการหาระยะเวลาการทำงานโดยวิธีต่างๆ ของวัสดุพิมพ์ปากอีพาสโตเมอร์ชนิดความหนืดเดียวไว้ 3 วิธีคือ 1. ตามวิธีของข้อกำหนดที่ 19 ของ ADA 2. โดยการใช้เครื่องมือวัดความหนืดออสซิลเลตติง (oscillating rheometer) และ 3. ใช้การวัดความเที่ยงตรงของวัสดุที่เวลาต่างๆ นับจากเริ่มผสม ผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาการทำงานที่ได้จากวิธีการต่างๆ มีความแตกต่างกัน ระยะเวลาการทำงานที่ได้จากความเที่ยงตรงของตายมีความสัมพันธ์กับสภาวะทางคลินิกมากที่สุด แต่จากทดสอบตาม ADA ก็สามารถเป็นที่ยอมรับได้ถึงแม้ว่าจะไม่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นช่วงเวลาที่สามารถใช้ประโยชน์ (application time) ก็ตาม ส่วนระยะเวลาการทำงานที่ได้จากเครื่องมือวัดความหนืดออสซิลเลตติงคือเวลาที่ความกว้างของเส้นที่บันทึกเป็น 5% ของความกว้างสุดท้ายนั้น พบว่าไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้จาก ADA และความเที่ยงตรงของตาย แต่ถ้าใช้ค่า 2% หรือ 3% แทน จะพบว่าค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าจาก ADA (Ohsawa และ Finger 1986)

ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับวิธีที่ใช้วัดลักษณะรีโอโลยีต่างๆ เช่นความหนืด, ความแข็งตึง และความยืดหยุ่น โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่ารีโอมิเตอร์ที่ควบคุมแรงเค้น (controlled stress rheometer) ซึ่งใช้การสั่น (oscillatory mode) ร่วมกับลักษณะการทดสอบของโคนและเพลต (cone-and-plate test configuration) หลักการของเครื่องมือชนิดนี้คือ ให้แรงบิดแก่วัสดุ โดยแรงบิดเกิดจากมอเตอร์ที่ถูกควบคุมโดยไฟฟ้า ซึ่งติดกับส่วนก้านของโคน โดยที่ตัวแปรต่างๆ ที่ควบคุมในขณะที่ทดสอบคือ เส้นผ่าศูนย์กลางของโคน, มุมของโคน, แรงบิดสูงสุดที่ใส่เข้าไป, ความถี่และเวลาของการสั่น, และความถี่ในการวัดค่าผลการทดสอบ ปริมาณแรงบิดที่ใส่เข้าไปนั้นจะต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่สามารถวัดได้ และการเลือกแรงบิดที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากแรงบิดแต่ละค่าจะทำให้เกิดคุณสมบัติรีโอโลยีที่แตกต่างกันออกไป หลักการของรีโอมิเตอร์ที่ควบคุมแรงเค้นนี้คือให้แรงบิดแก่วัสดุแล้ววัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความเครียดที่เกิดขึ้น จากผลการทดสอบในวัสดุพิมพ์ปากอีพาสโตเมอร์ 5 ชนิดพบว่า ในวัสดุบางชนิดอัตราการเพิ่มความหนืดหรือความแข็งตึงไม่สามารถใช้เป็นตัวบอกถึงอัตราการเกิดความยืดหยุ่นได้ (MacCabe, และ Carrick 1989) จากบทวิจารณ์ของ Abuasi และคณะ (1993) กล่าวเกี่ยวกับรีโอมิเตอร์ที่ควบคุมแรงเค้นนี้ว่าเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพง และพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเครื่องมือวัดความหนืดดีสเพลสเมนต์และวิธีของ ISO ในวัสดุบางชนิดจะมีระยะเวลาการทำงานมากเป็น 2 เท่าของ 2 วิธีหลังนี้ ซึ่ง

เขาได้อธิบายว่าแรงบิดที่ใช้ในการทดสอบสูงมากเกินไป ทำให้เกิดคุณสมบัติความบางเมื่อได้รับแรงเฉือนขึ้น หมายความว่าควรจะต้องมีการทดสอบของแต่ละกลุ่มของวัสดุเมื่อจะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือชนิดนี้

นอกจากการเปรียบเทียบวิธีในการหาระยะเวลาการทำงานต่างๆ ดังได้กล่าวมาแล้ว ยังมีอีกการศึกษาหนึ่งที่เปรียบเทียบเครื่องมือวัดความเหน็ดแคปิลารีกับโคนและเพลตในการหาระยะเวลาการทำงานของซิลิโคน ผลสรุปว่าเครื่องมือวัดความเหน็ดแคปิลารีให้ผลในการหาระยะเวลาการทำงานที่สอดคล้องกับสภาวะทางคลินิกได้ดีกว่า เนื่องจากเครื่องมือวัดความเหน็ดโคนและเพลตจะให้ค่าระยะเวลาการทำงานที่มากเกินไปจนความเป็นจริง (Eyre, Noort, and Ellis 1989)

เวลาที่ปล่อยให้วัสดุพิมพ์ปากอีลาสโตเมอร์แข็งตัวอยู่ในปาก ควรนานประมาณ 3-4 นาที โดยให้เลยระยะเวลาการแข็งตัวไปจนกระทั่งมีความยึดหยุ่นที่เพียงพอก่อนจะดึงออกจากปาก และควรดึงออกอย่างรวดเร็วในทิศทางที่ขนานกับแกนของฟัน (Asgar 1971) ในปี 1994 Craig และ Sun ได้สรุปเกี่ยวกับระยะเวลาที่ควรปล่อยวัสดุพิมพ์ปากทิ้งไว้ก่อนดึงออก ดังนี้แอตติชันซิลิโคนส่วนใหญ่และโพลีอีเธอร์ชนิดผสมอัดโนมิตจะอยู่ในช่วงเวลา 3-4 นาที ส่วนคอนเดนแซชันซิลิโคน ประมาณ 1-8 นาที Myers และ Peyton กล่าวว่าค่าของร้อยละของความเครียด (percentage of strain) และร้อยละของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (percentage of permanent deformation) ของซิลิโคนจะดีขึ้นอย่างรวดเร็วในครึ่งชั่วโมงแรก หลังจากผสมวัสดุ และความเที่ยงตรงจะดีขึ้นเมื่อทิ้งรอยพิมพ์ไว้ในปากให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ (Myers และ Peyton 1959)

จากการศึกษาในวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์พบว่าระยะเวลาที่วัสดุหลายๆ ชนิด การสิ้นสุดของความเหนียว (loss of tackiness) จะแตกต่างกันออกไปโดยอยู่ในช่วง 2-5 นาที หลังจากเริ่มผสม แต่พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างเวลาของการสิ้นสุดของความเหนียวกับเวลาที่วัสดุมีค่าการแข็งตัวอย่างถาวร (permanent set values) ต่ำกว่า 3% ดังนั้นการสิ้นสุดของความเหนียวจึงไม่ใช่ตัวบ่งชี้ที่ตินักที่ใช้บ่งบอกถึงระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุเหล่านั้น (Fairhurst และคณะ 1956)

## การศึกษาเกี่ยวกับความชื้นและการไหลแฉ่ของวัสดุพิมพ์ปาก

วัสดุพิมพ์ปากแต่ละชนิดมีความชื้นและการไหลแฉ่ที่แตกต่างกัน ส่วนเนื้อเยื่อในช่องปากก็มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) เช่นกัน ซึ่งเมื่อมีการพิมพ์ปากความชื้นหรือความหนืดของทั้งสองส่วนก็จะมีผลต่อกันและกัน การเลือกความชื้นของวัสดุพิมพ์ปาก และการควบคุมความชื้นของวัสดุพิมพ์ปากจะเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้วัสดุที่มีการไหลแฉ่ที่เหมาะสมกับชนิดของเนื้อเยื่อในช่องปากเพื่อให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (Thomas 1990)

คุณสมบัติของการไหลแฉ่ของวัสดุพิมพ์ปากมีผลต่อการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานแต่ละชนิด โดยจะเลือกวัสดุที่มีการไหลแฉ่ดีทันทีที่ใส่วัสดุเข้าที่ในช่องปากเพื่อจะให้เกิดการเคลื่อนที่ของเนื้อเยื่อให้น้อยที่สุด และเมื่อต้องการให้มีแรงกดลงบนเนื้อเยื่อ ควรเลือกวัสดุที่ค่อนข้างแข็งหรือมีการไหลแฉ่ต่ำ (Clark และ Phillips 1957) การศึกษาของ Thomas ในปี 1990 เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของวัสดุพิมพ์ปากชนิดอัลจินเนตที่มีความชื้นต่าง ๆ กันกับเนื้อเยื่อพบว่าเนื้อเยื่อทางด้านแก้มจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของวัสดุพิมพ์ปาก ส่วนทางด้านใต้ของด้านลิ้นขอบเขตของวัสดุพิมพ์ปากจะถูกกำหนดโดยความชื้นของวัสดุเอง

Clark และ Phillips (1957) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติการไหลแฉ่ของวัสดุพิมพ์ปากชนิดต่าง ๆ โดยใช้วิธีศึกษาที่ดัดแปลงมาจากข้อกำหนดของ ADA สำหรับซิงค์ฟอสเฟตซีเมนต์ (zinc phosphate cement) ดังนี้ ทดสอบการไหลแฉ่โดยฉีวัสดุที่ผสมแล้วปริมาณ 0.25 ซีซีลงระหว่างแผ่นแก้ว 2 แผ่นแล้วใช้แรงกดขนาด 200 กรัม หลังจากเวลาผ่านไป 10 นาทีจึงนำมาวัดหาเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยที่เกิดขึ้นผลการทดลองพบว่าวัสดุพิมพ์ปากซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลมีค่าของการไหลแฉ่ที่ค่อนข้างจะกว้าง และเขาได้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อการไหลแฉ่ของซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลมีค่าประมาณ 34 มม. จะมีลักษณะเป็นวัสดุที่มีความหนืดน้อยมาก (very thin material) ซึ่งสามารถไหลจากพวยผสมได้ง่ายและยากต่อการทำให้คงอยู่ในภาควิพิมพ์ปาก แต่เมื่อการไหลแฉ่มีค่า 20 มม. วัสดุจะมีลักษณะแข็งเหนียวติดพวยผสม เขาได้แนะนำว่าวัสดุซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลนี้ควรมีค่าของการไหลแฉ่ประมาณ 25-30 มม. จึงจะเหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าในขณะที่ช่วงเวลาผสมถึงใส่วัสดุลงในเครื่องมือทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงของการไหลแฉ่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และระยะเวลาการทำงานของวัสดุนี้ไม่ค่อยมีความสำคัญนักเนื่องจากมีเวลานานพอ ส่วนวัสดุพิมพ์ปากโพลีซิลไฟด์ 3 ชนิดที่นำมาทดสอบ มีการเปลี่ยนแปลงของการไหลแฉ่เพียงเล็กน้อยเช่นกันในระหว่างผสมและใส่ลงในเครื่องมือ ส่วนการไหลแฉ่ของอัลจินเนตมีการลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นช่วงเวลาระหว่างผสมและใส่วัสดุเข้าที่จึงมีความสำคัญมาก สุดท้ายคือพลาสติกสำหรับพิมพ์ปากพบว่าในช่วงแรกที่ผสมจะมีลักษณะเหลวมาก แต่จะมีการแข็งตัวขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 1-1.5 นาทีหลังจากเริ่มผสม และพลาสติกสำหรับพิมพ์ปากนี้มีการไหลแฉ่ต่ำที่สุดในวัสดุ

พิมพ์ปากทั้งหมดที่นำมาทดสอบ นอกจากทำการศึกษาเกี่ยวกับการไหลแผ่ของวัสดุพิมพ์ปาก แล้วเขายังได้ทดสอบหาความสัมพันธ์ของการไหลแผ่กับระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุ พบว่า โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อมีค่าของการไหลแผ่ลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนไปแล้วจะมีการลดลงของ ระยะเวลาการแข็งตัว และช่วงห่างระหว่างระยะเวลาการแข็งตัวในขณะเริ่มต้นกับช่วงสุดท้าย จะมีค่าน้อยลงด้วย แต่มีวัสดุอัลจินเนตบางตัวที่มีการลดลงของการไหลแผ่อย่างมากก่อนที่จะ ถึงระยะเวลาการแข็งตัวในขณะเริ่มต้น สรุปได้ว่าไม่เสมอไปที่เมื่อมีการลดลงของการไหลแผ่ แล้วจะสามารถคาดเดาถึงระยะเวลาการแข็งตัวของวัสดุนั้นได้อย่างถูกต้อง (Clark และ Phillips 1957)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย