

วรรณคดีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุที่ใช้ในการผลิตพลาสติกไมดูล

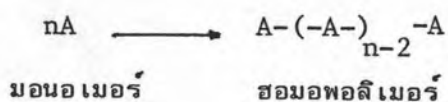
วัสดุที่ใช้ในการผลิตพลาสติกไมดูลคือ เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyurethane Elastomers) (4) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymer) ชนิดหนึ่ง (22)

ความหมายของพอลิเมอร์ (20, 23, 24)

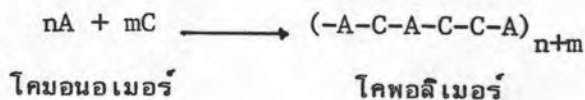
คำว่าพอลิเมอร์มาจากภาษากรีก โดย Poly แปลว่ามาก ส่วน Meros แปลว่าหน่วย รวมความแล้วพอลิเมอร์ หมายถึง สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ซึ่งได้จากการรวมตัวของโมเลกุลเล็ก ๆ หลาย ๆ หน่วยเข้าด้วยกัน

โมเลกุลเล็ก ๆ ที่มารวมตัวกัน เรียกว่า มอนอเมอร์ (Monomers)

ถ้าหน่วยมอนอเมอร์ทั้งหมดเป็นชนิดเดียวกัน โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ได้จะเรียกว่า สอมอพอลิเมอร์ (Homopolymers)



โดยมากแล้วหน่วยมอนอเมอร์ที่ใช้มักจะมีหลายชนิด ตั้งแต่สองขึ้นไป โมเลกุลขนาดใหญ่ ที่ได้จะเรียกว่าโคพอลิเมอร์ (Copolymers)



ประเภทของพอลิเมอร์ (20, 23, 24)

พอลิเมอร์แบ่งตามต้นกำเนิดได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Polymers) เช่น

ก. โปรตีน (Protein) หน่วยมอนอเมอร์ของมันก็คือ กรดอะมิโน (Amino Acids)

ข. พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เช่น แป้ง เซลลูโลส หน่วยมอนอเมอร์ของมันคือ กลูโคส (Glucose)

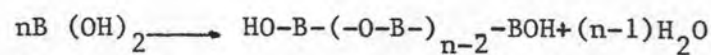
ค. กรดพอลินิวคลีอิก (Polynucleic Acid) เช่น กรดดีออกซี ไรโบนิวคลีอิก (Deoxy Ribonucleic Acid) หน่วยมอนอเมอร์ของมันคือกรดนิวคลีอิก

2. พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมี สามารถสังเคราะห์ได้พอลิเมอร์ในสภาวะเหลว, กึ่งเหลว-แข็ง และแข็ง

พอลิเมอร์สังเคราะห์แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์

1. สเต็ป พอลิเมอร์ (Step Polymers หรือ Condensation Polymers)

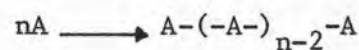
เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาอินทรีย์เคมีของมอนอเมอร์จำนวนมาก พร้อมกับขับโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น น้ำ, แอลกอฮอล์ ออกมา ตัวอย่างปฏิกิริยา คือ



สเต็ปพอลิเมอร์ที่พบตามธรรมชาติได้แก่ แป้ง เซลลูโลส ขนสัตว์ และใยไหม ส่วนที่สังเคราะห์ขึ้น ได้แก่ พอลิยูรีเทน, พอลิเอสเตอร์ (Polyesters) ฯลฯ

2. เซน พอลิเมอร์ (Chain Polymers หรือ Addition Polymers) เป็น

พอลิเมอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาอินทรีย์เคมีของมอนอเมอร์จำนวนมาก โดยไม่มีการขับโมเลกุลเล็ก ๆ ออกมา ตัวอย่างปฏิกิริยา คือ



ตัวอย่างของเซน พอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene), พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride) ฯลฯ

รูปโครงสร้างของโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Structural Shape of Polymer Molecules) (24)

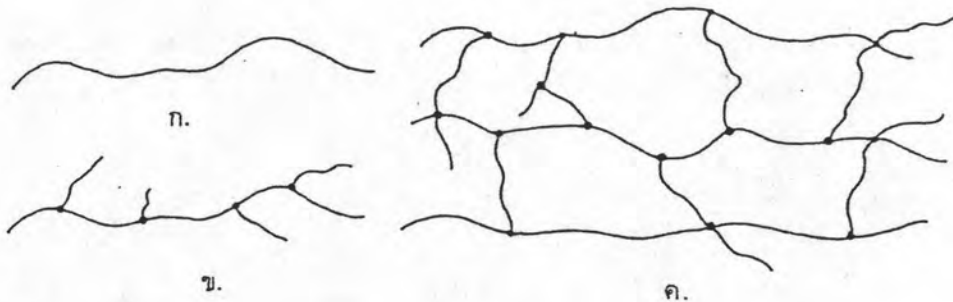
มี 3 ชนิดคือ

1. พอลิเมอร์ชนิดเส้น (Linear Polymers) เกิดจากมอนอเมอร์เชื่อมเป็นเส้นยาว โดยปลายต่อกัน

2. พอลิเมอร์ชนิดกิ่ง (Branched Polymers) เกิดจากมอนอเมอร์เส้นหนึ่งต่อเป็นกิ่งกับมอนอเมอร์อีกเส้นหนึ่ง

3. พอลิเมอร์ชนิดเชื่อมขวาง (Cross-linked Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสามมิติ หรือเชื่อมเป็นตาข่าย ได้จากพอลิเมอร์กิ่งเส้นหนึ่งต่อกับพอลิเมอร์กิ่งอีกเส้นหนึ่ง พอลิเมอร์ชนิดเชื่อมขวางจะมีกำลังความแข็งแรง (Strength) สูงกว่าและทนต่อแรงกระแทกดีกว่าชนิดเส้นและชนิดกิ่ง

โครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด มีดังนี้ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของพอลิเมอร์

ก. เส้น

ข. กิ่ง

ค. เชื่อมขวาง (24)

โครงสร้างของของแข็ง (24)

ของแข็งมีโครงสร้างสามแบบคือ

1. โครงสร้างโมเลกุล (Molecular Structure) เป็นโครงสร้างของอะตอมที่เกาะตัวเป็นโมเลกุล ตัวอย่างเช่น ไอโอดีน แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคน้อยมาก ส่วนมากเป็นแรง แวน เดอ วาลส์
2. โครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous Structure) เป็นโครงสร้างที่อนุภาคอยู่ปะปนไม่เป็นระเบียบ คล้ายของเหลว เช่น ซีเมนต์ พลาสติก แก้ว
3. โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) เป็นโครงสร้างของอะตอมที่เกาะตัวต่อเนื่องกันอย่างมีระเบียบทั้งสามแกน และซ้ำ ๆ กัน ตลอดทั้งมวล เกิดเป็นผลึกชั้น เช่น โลหะ

สัณฐานของพอลิเมอร์ (24)

พอลิเมอร์บางชนิดเป็นผลึก บางชนิดเป็นอสัณฐาน และบางชนิดอยู่ระหว่างผลึกกับอสัณฐาน

พอลิเมอร์ชนิดผลึกมีคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) คุณสมบัติความร้อน (Thermal Properties) และคุณสมบัติอื่น ๆ สูงกว่าชนิดอสัณฐาน

พันธะเคมี (Chemical Bond) (24)

ตามธรรมชาติ อะตอมจะอยู่รวมกันเป็นโมเลกุล เพื่อให้มีสภาพเสถียร (Stable) ซึ่งเป็นสภาพที่มีพลังงานต่ำ เมื่ออยู่ในสภาพเสถียรแล้ว ธาตุนั้นจะไม่มีปฏิกิริยากับธาตุอื่น เช่น แก๊สเฉื่อย จัดเป็นแก๊สเฉื่อย (Inert Gas) มีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดครบ 8 อนุภาค

อิเล็กตรอนชั้นนอกสุด เรียกว่า เวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) เป็นตัวเกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะเคมี

อะตอมจะพยายามปรับตัวเองโดยการรวมกับอะตอมอื่น เพื่อจัดเรียงตัวเองให้อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดเข้าสู่ลักษณะเสถียร อาจกระทำโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

1. รั่วอิเล็กตรอนส่วนเกินของอะตอมอื่น
2. ปลอ่ยอิเล็กตรอนให้อะตอมอื่น
3. ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน

ดังนั้นการเกิดพันธะเคมีก็คือ การจัดอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด ระหว่างอะตอมทั้งสองอะตอมเสียใหม่ เพื่อให้อยู่ในสภาพเสถียร

พันธะเคมีมีหลายประเภทคือ

1. พันธะปฐมภูมิ (Primary Bond) เป็นการยึดเหนี่ยวที่แน่นหนามาก ยึดอะตอมเข้าด้วยกันให้เป็นโมเลกุล ถ้าต้องการแยกให้อะตอมออกจากกัน ต้องใช้พลังงานสูงมาก พันธะปฐมภูมิ มี 3 ชนิดคือ

1.1 พันธะเชิงไอออน (Ionic Bond)

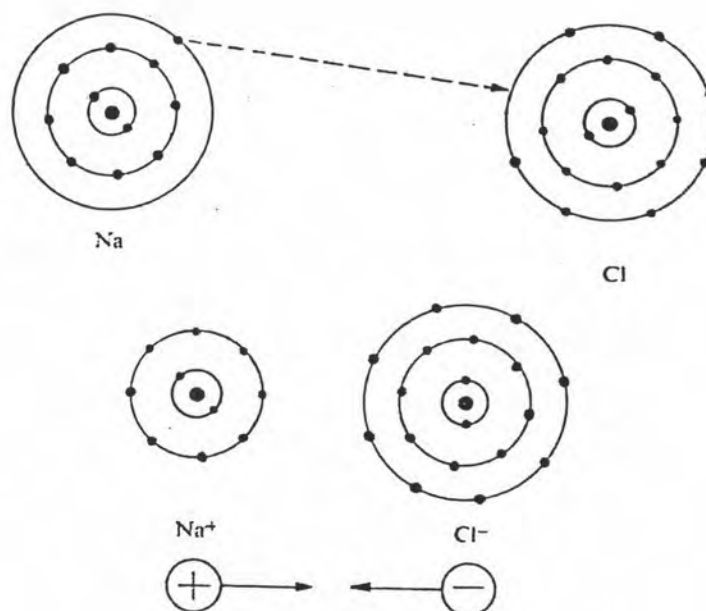
เป็นพันธะที่เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกินของอะตอมหนึ่ง ไปยังอีกอะตอมที่ยังขาดอิเล็กตรอนอยู่ เมื่อถ่ายเทอิเล็กตรอนให้แก่กันแล้ว อะตอมที่ให้อิเล็กตรอนจะเกิดไอออนบวก (Cation) และอะตอมที่ได้อิเล็กตรอนไปจะเกิดไอออนลบ (Anion) ไอออนทั้งสองมีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน จึงเกิดแรงดึงดูดกันทางไฟฟ้าระหว่างไอออนทั้งสอง ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาเคมีระหว่างโซเดียมกับคลอรีน ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมคลอไรด์

โซเดียมมีอิเล็กตรอน 1 อนุภาค ที่ชั้นนอกสุด จึงไม่มีเสถียรภาพ พร้อมทั้งให้อิเล็กตรอนส่วนเกินนี้

คลอรีนมีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดเพียง 7 อนุภาค ยังขาดอีก 1 อนุภาค จึงครบ 8 อนุภาค ซึ่งจะทำให้เกิดเสถียรภาพ

เมื่อโซเดียมรวมกับคลอรีน อิเล็กตรอนส่วนเกินของโซเดียมจะย้ายไปอยู่ร่วมกับอิเล็กตรอนของคลอรีน เพื่อให้ครบ 8 อนุภาค

โซเดียมจะกลายเป็นไอออนบวก ส่วนคลอรีนจะกลายเป็นไอออนลบ เกิดเสถียรภาพขึ้น (รูปที่ 2)

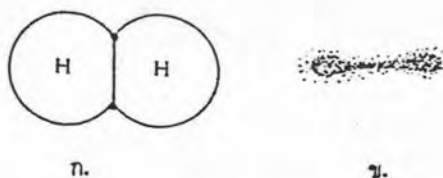


รูปที่ 2 พันธะเชิงไอออน แสดงการย้ายอิเล็กตรอนระหว่างโซเดียมกับคลอรีน ได้สารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (24)

1.2 พันธะโคเวเลนต์ (Covalent Bond)

เป็นการยึดเหนี่ยวของอะตอมเพื่อเป็นโมเลกุล โดยอะตอมเหล่านั้นไม่ถ้ายเหิอิเล็กตรอนให้แก่กัน เพราะต่างก็อยากได้อิเล็กตรอน จึงมาใช้ร่วมกัน อะตอมพวกนี้มักมีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดเกือบครบจำนวนเต็มสูงสุดอยู่แล้ว เมื่อได้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นก็ครบจำนวนสูงสุด ทำให้มีสภาพเสถียร

ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนมีอิเล็กตรอน 1 อนุภาค เมื่อรวมกับไฮโดรเจนอีก 1 อะตอม ไฮโดรเจนอะตอมทั้งสองจะใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน และครบจำนวนเต็ม 2 อนุภาค แก๊สไฮโดรเจนจึงอยู่ในสภาพเสถียร (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 แสดงพันธะโคเวเลนต์ของไฮโดรเจน
ก. ก่อนใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
ข. หลังใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (24)

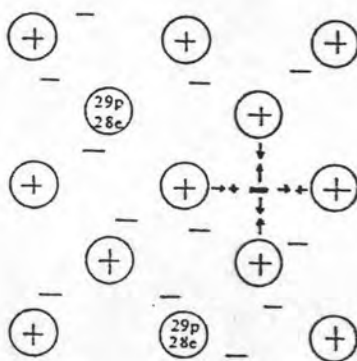
014212

1.3 พันธะโลหะ (Metallic Bond)

พันธะของอะตอมในโลหะต่างกับพันธะของอะตอมในแบบพันธะเชิงไอออนหรือพันธะโคเวเลนต์ กล่าวคือ ในโลหะอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมสามารถแยกตัวออกได้ง่าย เป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะจับตัวเป็นกลุ่ม เรียกว่ากลุ่มอิเล็กตรอนลบ (Negative Electron Cloud) ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลือในชั้นอื่น ๆ จะไปรวมกับนิวเคลียส เรียกว่า แกนไอออนบวก (Positive Ion Core) กลุ่มอิเล็กตรอนลบจะดึงดูดกับแกนไอออนบวกแน่นมาก

ตัวอย่างเช่น ทองแดงมีอิเล็กตรอนและโปรตรอนอย่างละ 29 อนุภาค ในชั้นที่สี่ของวงโคจร ซึ่งเป็นชั้นนอกสุดมีอิเล็กตรอนเพียงอนุภาคเดียว ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ไปรวมกับอิเล็กตรอนอิสระของอะตอมอื่น กลายเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนลบ ซึ่งกระจายทั่วไปในมวลสารนั้น ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลือในชั้นอื่น ๆ ซึ่งมีจำนวนครบสมบูรณ์ของแต่ละชั้นไปรวมกับนิวเคลียส กลายเป็นแกนไอออนบวก

แกนไอออนบวกดึงดูดกับกลุ่มอิเล็กตรอนลบแน่นมาก ทำให้ทองแดงมีรูปและขนาดถาวร มีคุณสมบัติเชิงกลสูง การที่โลหะเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีเพราะกลุ่มอิเล็กตรอนลบ กระจายทั่วมวล เป็นสื่อให้ความร้อนและกระแสไฟฟ้าผ่าน (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 แสดงกลุ่มอิเล็กตรอนลบกับแกนไอออนบวกของทองแดง (24)

2. พันธะทุติยภูมิ (Secondary Bond) เป็นการดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่เกิดจากศูนย์กลางของประจุไฟฟ้าบวก กับศูนย์กลางของประจุไฟฟ้าลบไม่อยู่ที่เดียวกัน ทำให้เกิดขั้วคู่ขึ้น (Electrical Dipoles) ขั้วคู่ของแต่ละอะตอมไปดึงดูดสลับกับขั้วคู่ของอะตอมอื่น แรงดึงดูดนี้เรียกว่า แรงแวน เดอ วาลส์ (Van der Waal's force) แรง แวน เดอ วาลส์ มีค่าน้อยกว่าแรงที่เกิดจากพันธะปฐมภูมิ พันธะทุติยภูมิแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

2.1 ฟลักทัวเอติง โพลารีเซชัน (Fluctuating Polarization or Dispersion Effect) เกิดจากกลุ่มอิเล็กตรอนในอะตอมไปหนาแน่นด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่ง ทำให้ด้านที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นมีประจุค่อนข้างไปทางลบ และอีกด้านหนึ่งมีประจุค่อนข้างไปทางบวก จึงคล้ายกับเป็นขั้วลบ ขั้วบวก ตัวอย่างเช่น แก๊สนีออน ซึ่งปกติเป็นแก๊สเฉื่อยในอุณหภูมิธรรมดา เพราะมีจำนวนอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดครบ 8 อนุภาค แต่ถ้าทำให้เย็นจัด อะตอมของแก๊สนีออน จะดึงดูดกับอะตอมอื่นได้ด้วยแรงน้อย ๆ เกิดจากอิเล็กตรอนไปหนาแน่นด้านหนึ่งกลายเป็นขั้วลบ อีกด้านหนึ่งมีอิเล็กตรอนน้อยกลายเป็นขั้วบวก (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 แสดงการหนาแน่นของอิเล็กตรอนในอะตอม

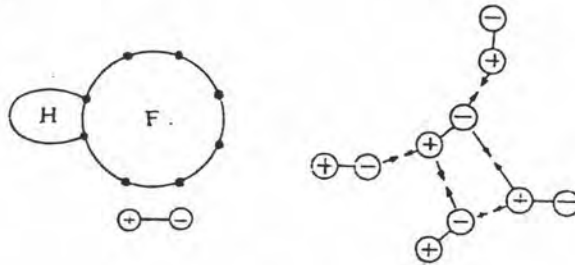
ก. เมื่ออิเล็กตรอนกระจายทั่ว ๆ ไป

ข. เมื่ออิเล็กตรอนหนาแน่นด้านล่าง (24)

2.2 โมเลกุลลา โพลารีเซชัน (Molecular Polarization) เป็นโมเลกุลที่มีศูนย์กลางของประจุไฟฟ้าบวก กับศูนย์กลางของประจุไฟฟ้าลบไม่อยู่ที่เดียวกัน เรียกว่า โพลาร์โมเลกุล (Polar Molecule) หรือ ไดโพล (Dipole)

ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ประกอบด้วยไฮโดรเจนซึ่งมีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด 2 อนุภาค และฟลูออรีน 8 อนุภาค เมื่อรวมกันเป็นโมเลกุลซึ่งใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ทำให้อิเล็กตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียสของฟลูออรีนสมบูรณ์กว่าอิเล็กตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียสของไฮโดรเจน จุดศูนย์กลางของประจุบวกไม่อยู่ที่เดียวกับจุดศูนย์กลางของประจุลบ จึงเกิดไดโพลขึ้น ผลของ

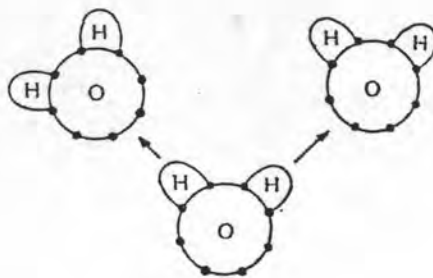
โคโพลีเกิดโมเลกุล ไพลาริเซชัน (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 แสดงโมเลกุล ไพลาริเซชันของไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (24)

2.3 ไฮโดรเจนบริดจ์ หรือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bridge, Hydrogen Bond) เป็นการเชื่อมระหว่างสองโมเลกุล โดยใช้อะตอมไฮโดรเจนทำหน้าที่คล้ายสะพานเชื่อมระหว่างสองโมเลกุลนั้น สภาพการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมไฮโดรเจนมีพันธะโคเวเลนต์ กับอะตอมที่มีสภาพไฟฟ้าลบ (Electronegativity) สูง ๆ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะไปเข้มข้นอยู่ทางด้านอะตอมที่มีสภาพไฟฟ้าลบสูง ทำให้อะตอมไฮโดรเจนเองเป็นบวกมาก เกือบกลายเป็นไฮโดรเจนไอออน ด้วยเหตุนี้อะตอมไฮโดรเจนจึงดึงดูดกับอะตอมอื่นที่มีสภาพไฟฟ้าลบสูงอีก การที่อะตอมไฮโดรเจนสามารถดึงดูดกับอะตอมอื่นอีกอะตอมหนึ่งที่มีสภาพไฟฟ้าลบสูง ๆ จนเกิดพันธะขึ้น พันธะชนิดนี้เรียกว่า ไฮโดรเจนบริดจ์

ตัวอย่างเช่น น้ำ ซึ่งประกอบด้วยไฮโดรเจน ดึงดูดด้วยพันธะโคเวเลนต์กับออกซิเจน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในไฮโดรเจนไปเข้มข้นทางด้านอะตอมออกซิเจน อะตอมไฮโดรเจนกลายเป็นไฮโดรเจนไอออน จะดึงดูดกับออกซิเจนของน้ำโมเลกุลอื่น (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 แสดงไฮโดรเจนบริดจ์ของน้ำ 2 โมเลกุล (24)

พันธะของพอลิเมอร์ (Bonding in Polymers) (24)

เป็นพันธะเคมีทั้ง 2 ประเภทคือ

1. พันธะปฐมภูมิ (Primary Bond) ส่วนใหญ่เป็นพันธะโคเวเลนต์ เช่น C - C, C = C และ C \equiv N ไม่พบพันธะโลหะในพอลิเมอร์

2. พันธะทุติยภูมิ (Secondary Bond) หรือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่พบในพอลิเมอร์ เช่น

2.1 ไฮโดรเจน บริดจ์ (Hydrogen Bond, Hydrogen Bridge)

2.2 พันธะโพลาร์ (Polar Bond)

พันธะเคมีของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น ถ้าทำให้มีโครงสร้างโมเลกุลแบบเชื่อมขวางและแข็งเกร็ง (Rigid, Cross-linked Molecular Structure) ก็จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ชนิดพลาสติกทนความร้อน (Thermosetting Plastics)

แต่ถ้าพันธะเคมีที่เกิดขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างโมเลกุลแบบที่มีความสามารถในการคืนตัวได้ดี (Flexible Molecular Structure) ซึ่งจะเป็นแบบเส้น (Linear Polymer) หรือแบบกิ่ง (Branched Polymer) ก็ตาม ก็จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ชนิดพลาสติก ซึ่งอ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน เรียกว่า เทอร์มอพลาสติก (Thermoplastic) (24, 26)

การจำแนกประเภทของพลาสติก (20, 23, 24, 25, 26)

พลาสติกแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. เทอร์มอเซตติง พลาสติก
2. เทอร์มอพลาสติก

เทอร์มอเซตติง พลาสติก เป็นพอลิเมอร์ที่คงรูปร่างเดิมอยู่ได้ เมื่อถูกความร้อน โดยไม่เกิดการอ่อนตัว, หลอมเหลวหรือนำไปหล่อใหม่ได้อีก แต่จะเกิดการเสื่อมคุณสมบัติ

พอลิเมอร์ชนิดนี้ ผลิตจากของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งเมื่อให้ความร้อนก็จะเกิดการเชื่อมขวางเกิดขึ้นมาก (Highly Cross-links) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่แข็งไม่หลอมเหลว และไม่ละลาย

ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ชนิดนี้ เป็นโครงสร้างโมเลกุลแบบเชื่อมขวาง แข็งเกร็ง และเป็นสามมิติ (Rigid, Cross-linked, Three-dimensional Networks)

เทอร์มอพลาสติก เป็นโพลีเมอร์ที่อ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และกลับสภาพเดิมเมื่อเย็นลง

เมื่อสารเทอร์มอพลาสติกถูกความร้อน มันจะอ่อนตัวลง จนกลายเป็นของเหลวที่สามารถไหลได้ ซึ่งเมื่อให้ความดันแล้ว มันจะถูกส่งผ่านจากเข้าทลอม ไปสู่แบบหล่อที่เย็น หลังจากเย็นลงในแบบหล่อ สารเทอร์มอพลาสติกจะแข็ง และมีรูปร่างเช่นเดียวกับแบบหล่อ นำไปใช้งานได้ เมื่อต้องการนำไปทลอมเหลวและหล่อใหม่ ก็สามารถทำได้โดยขบวนการเดิมได้อีก แต่มันจะมีการเสื่อมอายุ เนื่องจากการถูกความร้อนสูงหลาย ๆ ครั้ง เป็นการจำกัดจำนวนรอบของการผลิตใหม่

ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเป็นแบบเส้น (Linear Polymer) หรือแบบกิ่ง (Branched Polymer) อาจมีการเชื่อมขวาง (Cross-links) จำนวนเล็กน้อยมาก หรือไม่มีเลย

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ (Physical Properties of Polymers) (23)

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์มากก็คือ

1. อุณหภูมิ (Temperature) (23, 24, 25) การตอบสนองของโพลีเมอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นหนึ่งในสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ

อุณหภูมิที่มีความสำคัญยิ่งคือ อุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาค (Transition Temperature) คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนจากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่ง

อุณหภูมิเปลี่ยนวัฏภาคของโพลีเมอร์มี 2 แบบคือ

1.1 Crystalline Melting Temperature (T_m) คืออุณหภูมิที่โครงสร้างผลึกในพอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว และพอลิเมอร์กลายเป็นของเหลว

1.2 Glass Transition Temperature (T_g) คืออุณหภูมิที่โครงสร้างอสัณฐานในพอลิเมอร์แข็งตัว มีคุณสมบัติคล้ายแก้ว เนื่องจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลช้าลง

ยังมีอุณหภูมิที่สำคัญอีกแบบก็คือ อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมจากความร้อน (Thermal Degradation) ซึ่งพอลิเมอร์เชน (Polymer Chains) เกิดการสลายตัว (Decompose)

2. การเชื่อมขวาง (Cross-links)

การเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์เช่นแต่ละอัน มีความสำคัญต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์มาก เป็นตัวกำหนดให้พอลิเมอร์นั้นเป็นเทอร์โมเซตติง, เทอร์โมพลาสติก หรืออีลาสโตเมอร์

3. แรงยึดระหว่างพอลิเมอร์เช่น (Interchain Forces)

ในพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเชื่อมขวาง (Non cross-linked Polymers) แรงยึดระหว่างพอลิเมอร์เช่นจะเข้ามามีบทบาทมาก ตัวอย่างเช่นพันธะไฮโดรเจนในการสร้างโปรตีน

ในพอลิเมอร์ส่วนมาก แรงยึดระหว่างพอลิเมอร์เช่นจะเป็นเพียง แรงแวน เดอ วาลส์ ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน

พอลิเมอร์จะไม่มีผลกระทบอย่างแท้จริง แต่มันมักจะมีบริเวณที่พอลิเมอร์ไม่เลกุลเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ คล้ายเป็นผลึก บริเวณนั้นจะเรียกว่า คริสตัลไลต์ (Crystallites) ส่วนบริเวณอสัณฐาน (Amorphous Region) ที่อยู่ระหว่างบริเวณคริสตัลไลต์ พอลิเมอร์ไม่เลกุลจะเรียงตัวแบบอิสระมากกว่า (Random Orientation) ความสมดุลระหว่างบริเวณอสัณฐานกับบริเวณคริสตัลไลต์มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่ไม่มีบริเวณคริสตัลไลต์จัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน ซึ่งจะมีแรงระหว่างเช่นอ่อนแอ ทำให้แต่ละเช่นสามารถเลื่อนผ่านกันและกันได้ง่าย ทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความทนแรงดึง (Tensile Strength) ต่ำ และเสียรูปได้ง่าย

พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างผลึกแบ่งเป็น 2 ชนิด (23)

1. พอลิเมอร์ผลึกที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Unoriented Crystalline Polymers)
2. พอลิเมอร์ผลึกที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Oriented Crystalline Polymers)

1. พอลิเมอร์ผลึกที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีลักษณะดังนี้คือ ประกอบด้วย บริเวณคริสตัลไลต์มากมาย ซึ่งจะเรียงตัวแบบอิสระซึ่งกันและกัน เนื่องจากบริเวณคริสตัลไลต์เหล่านี้ จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิหนึ่งอย่างรวดเร็ว พอลิเมอร์ชนิดนี้จึงมีอุณหภูมิ T_m ที่กำหนดแน่นอน ซึ่งอุณหภูมิที่สูงกว่านี้มันจะกลายเป็นอสัณฐาน และหลอมเหลว ทำให้หล่อเป็นรูปร่างได้ง่าย

2. พอลิเมอร์ผลึกที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ มีลักษณะดังนี้คือ มีการเรียงตัวของบริเวณคริสตัลไลต์อย่างเป็นระเบียบซึ่งกันและกัน ทำให้มีคุณสมบัติที่มีประโยชน์มาก คือมีความทนแรงดึง (Tensile Strength) สูงกว่าพวกที่ 1

การเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Orientation) ของพอลิเมอร์นี้ กระทำได้โดยการยืด (Stretch) (26, 27) พอลิเมอร์ผลึกที่มีการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบตามความยาว ทำให้พอลิเมอร์ได้รับความเค้นดึง (Tensile Stress) ไปตามแนวแกนที่ดึง โดยปกติจะกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g แต่ต่ำกว่า T_m จะพบว่าพอลิเมอร์มีความยาวมากขึ้น บริเวณคริสตัลไลต์จะถูกดึงไปพร้อม ๆ กัน และเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบไปตามทิศทางของแนวแรง ทำให้พอลิเมอร์นี้มีความทนแรงดึง (Tensile Strength) สูงขึ้น

อีลาสโตเมอร์ (สารยืดหยุ่น, Elastomers) (25)

คำจำกัดความ

อีลาสโตเมอร์ หมายถึง วัสดุที่เมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้อง สามารถถูกยืดซ้ำ ๆ ออกเป็นความยาวอย่างน้อย 2 เท่า ของความยาวเดิม และเมื่อถอนแรงดึงออกไป วัสดุนั้นจะสามารถคืนกลับอย่างมีแรงสู่ความยาวใกล้เคียงกับความยาวเดิม พลาสติกที่มีคุณสมบัติเช่นนี้เรียกว่า อีลาสโตเมอร์พลาสติก (Elastomeric Plastics)

อีลาสโตเมอร์ ตามคำจำกัดความของ The American Society for Testing and Material (ASTM) หมายถึง "วัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถกลับคืนอย่างรวดเร็วสู่ขนาดและรูปร่างซึ่งใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น หลังจากที่ถูกทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โดยการให้แรงขนาดน้อย ๆ และถอนแรงนั้นออกไป

พฤติกรรมของอีลาสโตเมอร์ (Elastomeric Behavior)

Busse (28) กล่าวว่า วัสดุที่จะนับว่าเป็นอีลาสโตเมอร์ ถ้ามีลักษณะดังนี้

1. ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขนาดยาว ซึ่งมีพันธะของเชนหลัก (Main Chain) ที่สามารถหมุนได้อย่างอิสระ ทำให้เชนนี้อาศัยความสามารถในการคืนตัว (Flexible)
 2. มีแรงยึดอย่างอ่อน (Weak Interaction) ระหว่างโมเลกุลที่มีขนาดยาวเหล่านั้น ทำให้มันสามารถเลื่อนผ่านกันและกันได้
 3. มีการเชื่อมขวางมากพอที่จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบสามมิติ
- คุณสมบัติเหล่านี้เมื่อรวมกันแล้ว ทำให้เห็นได้ว่า การมีสภาพยืดหยุ่น (Elasticity) สูง เป็นผลมาจากการเคลื่อนไหวของส่วนย่อย ๆ ของโมเลกุล

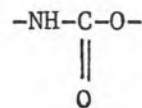
โครงสร้างของอีลาสโตเมอร์

อีลาสโตเมอร์มีลักษณะที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์อสัณฐานกับพอลิเมอร์ผลึก (23) คุณสมบัติการยืดหยุ่น (Elastic Properties) ได้จากการที่พอลิเมอร์นั้นส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน ซึ่งมีเพียงแรงยึดอ่อน ๆ ระหว่างเชน และมีบริเวณคริสตัลไลต์เล็กน้อย เพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เสียรูปร่าง (Plastic Flow) ความสมดุลกันระหว่าง 2 บริเวณนี้ ทำให้เกิดอีลาสโตเมอร์ขึ้น เมื่อพอลิเมอร์ถูกยืดยาวออก บริเวณอสัณฐานจะถูกยืด เช่นทั้งหลายจะมาเรียงตัวกันค่อนข้างขนาน ทำให้เกิดภาวะกึ่งผลึกขึ้น (Semicrystalline State) แต่แรงระหว่างพอลิเมอร์เชนของอีลาสโตเมอร์นั้นอ่อนแอกว่าที่จะคงสภาวะกึ่งผลึกนี้ได้ เมื่อถอนแรงออกไป ทำให้พอลิเมอร์กลับคืนสู่สภาพเดิมที่ส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน การเชื่อมขวางก็มีส่วนสำคัญที่ทำให้อีลาสโตเมอร์มีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพ (Stability) เนื่องจากพบว่าอีลาสโตเมอร์ที่ไม่มีการเชื่อมขวาง มักจะมี Creep เกิดขึ้น [Creep (25) หมายถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดตามมา หลังจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ไม่แข็งเกร็ง (Nonrigid Material) เมื่อมีแรงคงที่กระทำ (Static Load)] และมีการเสียรูปร่างได้ง่าย

เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Polyurethane Elastomers)

พอลิยูรีเทน (29) เป็นสารที่มีคุณสมบัติกว้างขวางมาก จึงสามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น โฟม (Foams) , เส้นใย (Fibers) สารที่ใช้เคลือบผิว (Coatings) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers)

คุณสมบัติที่แตกต่างกันเหล่านี้ เนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความแข็งตึงหรือความสามารถในการคืนตัว (Chain Stiffness หรือ Flexibility) สภาวะผลึก (Crystallinity), การเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (Orientation), แรงดึงดูดระหว่างเชน (Interchain Attraction) และการเชื่อมขวาง (Cross-link) โดยมีองค์ประกอบร่วมกันคือ Urethane Linkage



ซึ่งเป็นลักษณะของพอลิยูรีเทนทุกชนิด

คำว่าพอลิยูรีเทน หมายถึง (30) พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย Urethane Linkage ถึงแม้ว่าจะมี Functional Group แตกต่างกันไป เช่น เอสเทอร์ (Ester) , อีเทอร์ (Ether) , เอไมด์ (Amide) , ยูเรีย (Urea) ฯลฯ

ประวัติ (22)

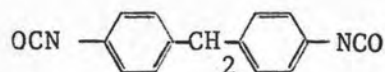
เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์พัฒนามาจากโซลิดยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Solid Urethane Elastomers) ซึ่งได้มีการคิดค้นขึ้นมาในทวีปยุโรป ในช่วงต้น ๆ ของทศวรรษที่ 1940 จากนั้นก็ได้มีการพัฒนามาเรื่อย ๆ จนผลิตเป็นการค้าในช่วงทศวรรษที่ 1960

วัสดุในการผลิต (Materials) (22, 29)

เทอร์มอพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ หรือเรียกย่อ ๆ ว่า TPU เป็นผลิตผลจากปฏิกิริยาระหว่าง Diisocyanate กับ Hydroxyl Terminated Polyether หรือ Polyester Polyol และ Low Molecular Weight Glycol Chain Extender

1. Diisocyanate ที่นิยมใช้คือ MDI (Diphenyl Methane Diisocyanate)

มีสูตรโครงสร้างดังนี้



2. Polyols มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า Chain Extenders เป็นพวกสารประกอบที่มี -OH Groups ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Diisocyanates เพื่อทำให้เกิด Urethane Linkage Polyols นี้ จะเป็นส่วนอสัณฐาน และเป็นส่วน Soft Segment ของ TPU Polyols ที่ใช้ในการผลิต TPU มี 2 จำพวกคือ

2.1 Polyesters เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่าง Dibasic Acids ซึ่งโดยมากจะใช้ Adipic Acid กับ Diols เช่น Ethylene Glycol, 1,2 Propylene Glycol, Diethylene Glycol ทำให้มีบริเวณส่วนปลาย (Terminate) เป็น -OH Groups

2.2 Polyethers โดยมากมักจะใช้ Poly-Oxy-Propylene Glycols ซึ่งได้จาก แอนไอออนิก พอลิเมอร์ไรเซชัน (Anionic Polymerization) ของ Propylene Oxide ทำให้มีบริเวณส่วนปลายของเซนเป็น -OH Groups

3. ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ใช้เพื่อเป็นตัวกำหนดอัตราเร็ว และทิศทางของขบวนการสร้างพอลิเมอร์ ในปฏิกิริยาของ TPU นิยมใช้ Tertiary Amines และ Organo-Tin Compound การผสมสารประกอบเหล่านี้ลงไป ทำให้มีความสมดุลระหว่างการสร้าง Chain ให้อยาวขึ้น (Chain Extension) กับการเชื่อมขวาง (Cross-links) เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน

4. สารช่วยทำให้เซนยาวขึ้น (Chain Extenders) (22, 29, 30) เป็นสารประกอบพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ใช้เพื่อเปลี่ยนพรีพอลิเมอร์ (Prepolymers) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ให้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สารที่ใช้เป็นพวก Difunctional, Active Hydrogen-Containing Compound ที่นิยมใช้คือ Glycols การใช้ Glycols จะทำให้ได้ Urethane Linkage ซึ่งมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงมาก เป็นส่วน Hard segment ของ TPU

ปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactions)

ขั้นตอนในการผลิต TPU มีดังนี้ (30)

1. การเตรียมพรีพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
2. Chain Extension เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น

3. การสร้างการเชื่อมขวาง (Cross-links) ใน TPU จะออกแบบการผลิตให้มีการเชื่อมขวางเพียงเล็กน้อย

ปฏิกิริยาเคมีจะแสดงโดยกำหนดสัญลักษณ์ดังนี้ (29, 30)

(OH)P(OH) = Polyester, Polyether Chain ซึ่งมีปลายเป็น -OH Groups

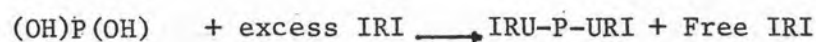
IRI = Diisocyanate ซึ่งหลังจากทำปฏิกิริยากับ-OH จะให้ Urethane Linkages

URU = Urethane Linkages

(OH)G(OH) = Glycol Chain Extenders, ซึ่งมี -OH Groups

1. การเตรียมพรีพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

เริ่มโดย Polyether หรือ Polyester ซึ่งเป็น Soft segment. ทำปฏิกิริยากับ Diisocyanate ที่มากเกินไป (Excess) เพื่อให้ได้ Isocyanate Terminated Prepolymer

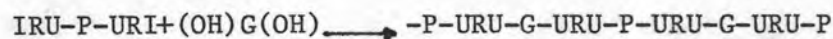


Polyether Diisocyanate Prepolymer

หรือ Polyester

2. Chain Extension

พรีพอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับ Glycol Chain Extenders ทำให้เกิดพอลิเมอร์ที่มี Urethane Linkages เป็นส่วน Hard Segment

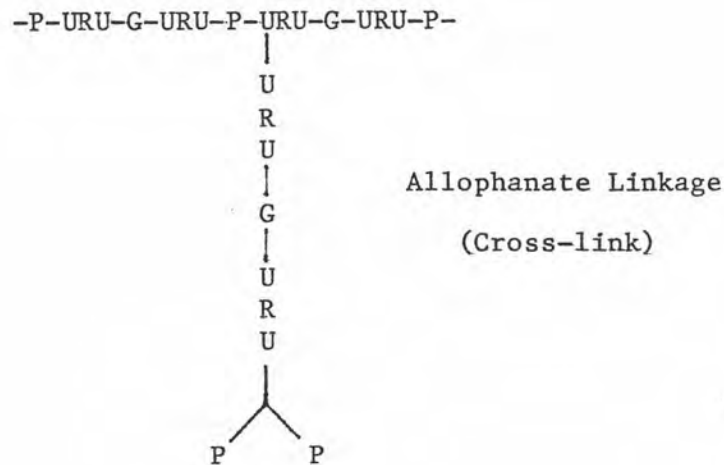


Prepolymer Glycol Urethane Linkage

3. Cross-links การเกิดการเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์เช่น

จะเกิดไปพร้อม ๆ กันกับปฏิกิริยา Chain Extension เมื่อมี Excess Diisocyanate โดยใช้ Free IRI ซึ่งก็คือ Diisocyanate ที่เหลือใช้จากการเตรียมพรีพอลิเมอร์ ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนกัมมันต์ (Active Hydrogen) ของยูรีเทน ซึ่งได้จาก

ปฏิกิริยาในข้อ 2 ทำให้ได้ Allophanate Linkage ซึ่งเป็น Cross-link (รูปที่ 8)



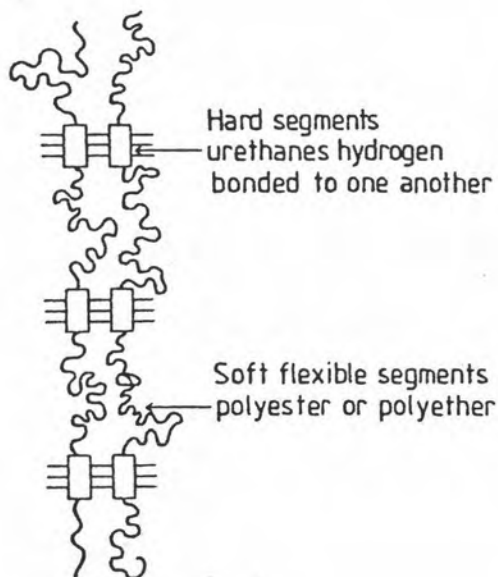
รูปที่ 8 แสดงการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์เซน (29)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า พอลิยูรีเทนมีคุณสมบัติที่กว้างขวางมาก ซึ่งเนื่องมาจากการจัดกระทำให้มีโครงสร้างของส่วนย่อย ๆ แตกต่างกันไป ดังนั้น จากรูปที่ 8 อธิบายได้ว่า ความสามารถในการคืนตัว (Flexibility) จะได้จากส่วน "P" Section ซึ่งเป็นส่วนที่ยาวและ Flexible การเชื่อมขวาง (Cross-links) จะเป็นตัวเพิ่มโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus) และความทนแรงดึง (Tensile Strength) และคงรูปร่างเดิมได้ดีขึ้น ถ้าไม่มีส่วน "G" Section และส่วน "P" Section เชื่อมกับส่วน "URU" Section ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ก็จะมี ความแข็งดึง "Stiffness) เพิ่มขึ้น และมีคุณสมบัติค่อนข้างไปทางอีลาสโตเมอร์

การที่มีส่วนประกอบทางเคมีมากมายเช่นนี้ ทำให้มีคุณสมบัติทางกายภาพ (Physics) สันแปรได้มาก โมเลกุลของพอลิยูรีเทนจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

1. Hard Segment คือส่วนของพอลิยูรีเทน
2. Soft Segment คือพอลิเอสเทอร์ (Polyester) และพอลิอีเทอร์ (Polyether)

ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ ๑ โครงสร้างของพอลิยูรีเทน (๒๙)

จากรูปที่ ๑ จะเห็นได้ว่าส่วน Soft Flexible Segment ที่มันว่องนี้สามารถถูกดึงให้ยืดออกได้อย่างง่ายดาย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการยืดได้ และ Flexible

ส่วน Hard Segments จะยึดซึ่งกันและกันด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งแข็งแรงมาก ทำให้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนมีเสถียรภาพ (Stability) และมี ความแข็งแรง (Strength) สูง

ผลของ Hard Segment ต่อคุณสมบัติเชิงกล (Effect of Hard Segment Domains on Mechanical Properties) (๓๑)

เมื่อมีแรงกระทำต่อพอลิเมอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงการเรียงตัว และมีการเคลื่อนไหวยของส่วน Hard Segment โดยมีการเรียงตัวใหม่ไปตามทิศทางของแรง (รูปที่ ๑๐)

วัสดุจะมีความต้านทานต่อความเค้น (Stress) ที่มากกระทำ, ความทนแรงดึง (Tensile Strength), การยืด(Elongation), กำลังความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength) สูงขึ้น

7. มีความสามารถในการคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ (Flexibility at Low Temperature)
8. มีความจุของการรับแรงสูง (High Load-Bearing Capacity)

ความแปรผันของคุณสมบัติ (Property Variations) (22)

ลักษณะหลักของ TPU จะถูกเปลี่ยนแปลงได้ 3 ทางคือ

1. ความแข็ง (Hardness) จะถูกควบคุมโดยอัตราส่วนระหว่าง Hard (Glycol) ต่อ Soft (Polyol) Segments ถ้าอัตราส่วน Hard ต่อ Soft Segment มากขึ้น พอลิเมอร์ จะมีความแข็งมากขึ้น
2. ระดับขั้นของการเชื่อมขวาง (Degree of Cross-links) ซึ่งควรจะมีเพียงเล็กน้อย เพื่อคงสภาพเทอร์มอพลาสติกไว้นั้น ถูกควบคุมเป็นส่วนใหญ่ โดยอัตราส่วนระหว่าง Diisocyanate ต่อกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl Groups) ทั้งหมด คือรวม Polyol และ Glycol ด้วย และอาจจะถูกควบคุมโดยการเติมตัวกระทำการเชื่อมขวาง (Cross-linking Agent) ลงไปในปฏิกิริยา การมีระดับขั้นของการเชื่อมขวางเพียงเล็กน้อย จะปรับปรุงความต้านทานต่อน้ำมันและความร้อน (Oil and Heat Resistance)
3. คุณสมบัติทางกายภาพ, คุณสมบัติเชิงกล, และการเสื่อมตามอายุของพอลิเมอร์ (Physical, Mechanical and Aging Properties) จะขึ้นกับชนิดของ Polyol ที่ใช้คือ Polyester หรือ Polyether

ในกรณีที่มีความแข็งเท่ากัน Polyether based TPU จะมีความสามารถในการคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำดีกว่า มีริชิลีเยนซ์ (Resilience) สูงกว่า มีเสถียรภาพในน้ำดีกว่า (Hydrolysis Stability) และมีความทนต่อเชื้อราดีกว่า (Fungus Resistance) ในขณะที่ Polyester-based TPU จะมีความต้านทานต่อการขีดข่วน, น้ำมัน และมี Toughness ดีกว่า

เสถียรภาพของ TPU ภายใต้สภาวะการใช้งาน (22)

1. เสถียรภาพต่อการแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis Stability) Ether-based TPU เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น จะมี Hydrolysis Stability เหนือกว่า Ester-based TPU จะมีเสถียรภาพได้ดี โดยการเติม Polycarbodiimide Stabilizer
2. Polyether-based TPU จะมีรีซีเลชั่นสูงกว่า Polyester-based TPU
3. ทั้ง Ether และ Ester-based TPU จะมีความต้านทานต่อโอโซนดีมาก
4. Ether-based TPU มีความต้านทานต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา ส่วน Ester-based TPU พบว่าเชื้อรามีการเจริญเติบโตได้ จึงอาจเติมสารฆ่าเชื้อรา (Fungicides) ลงไป
5. Ester-based TPU มีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันในอุณหภูมิสูงดีกว่า Ether-based TPU ซึ่งหมายความว่าเมื่อวัสดุถูกทิ้งให้อยู่ในออกซิเจนเป็นเวลาเท่ากัน Ether-based TPU จะมีความทนแรงดึงลดลงมากกว่า
6. การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Exposure) จะมีผลกระทบต่อ TPU อย่างไรนั้น จะขึ้นกับความหนาและสี (Thickness and Pigmentation) ของวัสดุ อาจเติมสารที่ทำให้เกิดเสถียรภาพต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Stabilizers) เช่น Carbon Black พบว่า TPU ที่ไม่มีสี จะเริ่มแสดงการเปลี่ยนสีตามอายุ หลังจากแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 20 ถึง 50 ชั่วโมง นอกจากนั้นความทนแรงดึงของวัสดุที่บาง จะลดลงอย่างมาก แต่วัสดุที่หนาจะมีความทนแรงดึงเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลานาน

กรรมวิธีการผลิต (20)

กรรมวิธีการผลิตที่นิยมใช้ในการผลิตพลาสติกโมดูลมี 2 วิธีคือ

1. Injection Molding

พอลิเมอร์จะถูกให้ความร้อน (Preheated) ในช่องทรงกระบอกร้อน จนกระทั่งมีอุณหภูมิสูงพอที่จะไหลได้ ก็จะถูกดันให้เข้าไปในแบบหล่อ (Mold) ที่มีอุณหภูมิต่ำเย็น โดยใช้ความดันสูง แล้วทิ้งให้เย็น จะได้รูปร่างตามแบบที่ต้องการ

2. Extrusion

พอลิเมอร์จะถูกทำให้ร้อนและอ่อนตัวลงจนไหลได้ จากนั้นจะใช้แรงดันผ่านช่องของแม่พิมพ์ (Die) ให้ออกมาเป็นแผ่น ทั้งให้เย็น แล้วจึงตอก (Stamp) ให้ออกมาเป็นรูปร่างของพลาสติกโมดูลตามที่ต้องการ

พฤติกรรมของพลาสติกโมดูล (Material Behavior of Plastic Modules) (19)

พลาสติกโมดูล เป็นที่นิยมใช้กันมากในคลินิกทันตกรรมจัดฟัน เพื่อเป็นวัสดุที่แข็งแรงดี เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ

1. ทันตแพทย์เป็นผู้ถอดใส่พลาสติกโมดูลลงบนฟันของผู้ป่วยเอง ทำให้แน่ใจได้ว่ามีแรงกระทำต่อตัวฟันอย่างแน่นอน ในขณะที่เครื่องมือบางชนิดต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้ป่วยเป็นผู้ถอดใส่ (8)

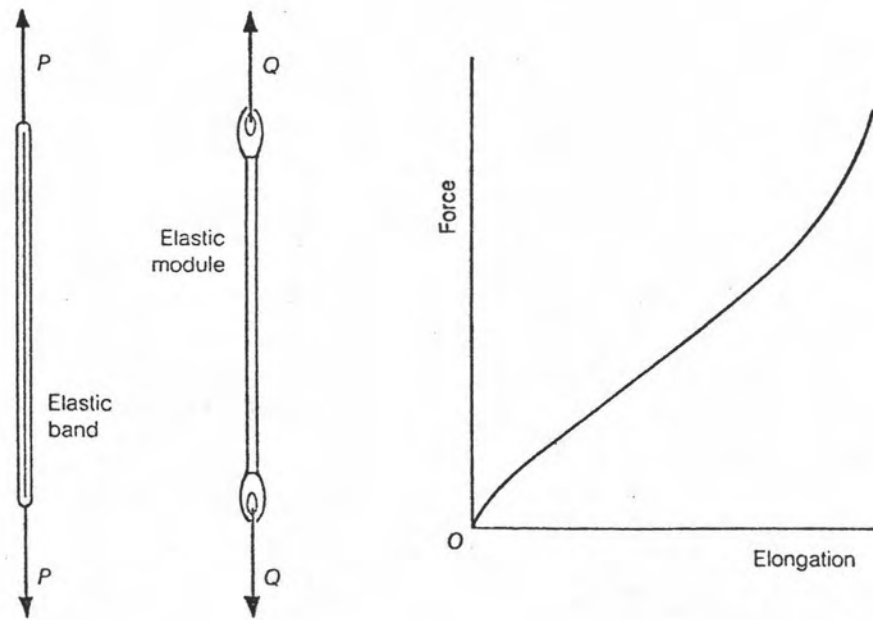
2. ใช้เวลาในคลินิกน้อย (2)

3. ผู้ป่วยมีสุขภาพช่องปากที่ดี เนื่องจากพลาสติกโมดูลไม่สะสมเศษอาหาร (2)

4. มีความแข็งแรง และทนต่อการขัดถูได้ดีกว่าอิลาสติก (5)

5. ใช้ในการเคลื่อนฟันได้หลายทิศทาง (4, 5, 6, 7)

นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคืนตัวสูง (Flexibility) มีขนาดเล็กและราคาถูก (19) การยึดโมดูลเพื่อใช้งานแสดงในรูปที่ 11



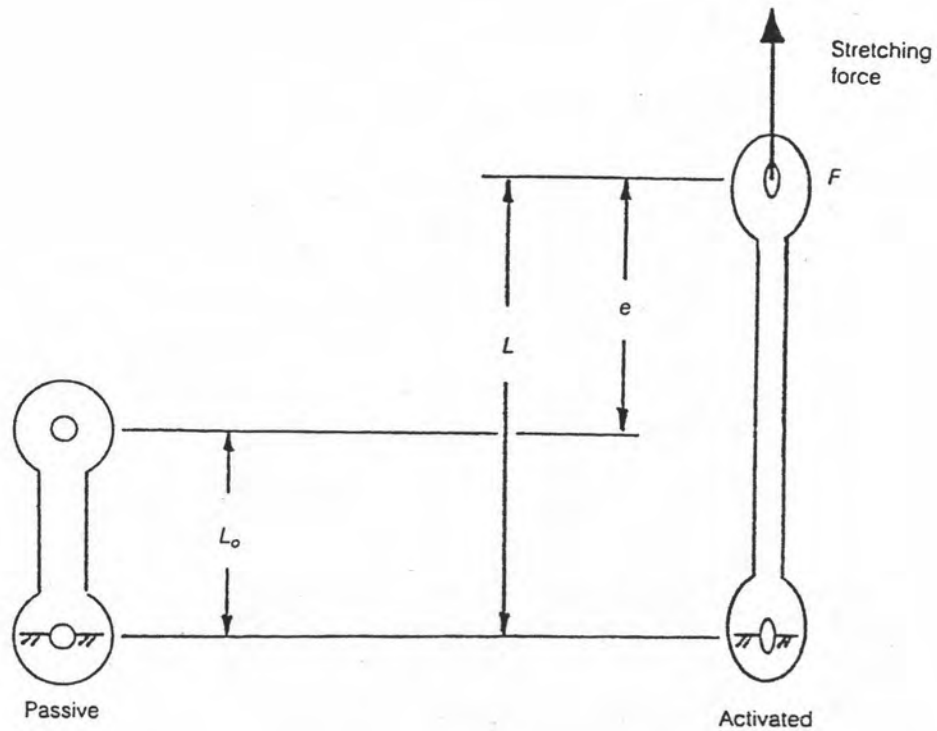
รูปที่ 11 แสดงการยึดโมดูลเพื่อใช้งาน (ซ้าย) และไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อการผิดรูป (ขวา) (19)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อการผิดรูปของพลาสติกโมดูล (Load-Deformation Behavior of Plastic Modules) (19)

Load หมายถึง แรงภายนอกที่มากระทำต่อวัตถุ ทำให้วัตถุเกิดการผิดรูป
 การผิดรูป (Deformation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเพียงบางส่วน
 หรือทั้งหมด ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบแรงของวัตถุนั้น

ลักษณะการยึดตัวของพลาสติกโมดูล เมื่อได้รับแรงดึง และเกิดการผิดรูป แสดงใน

รูปที่ 12

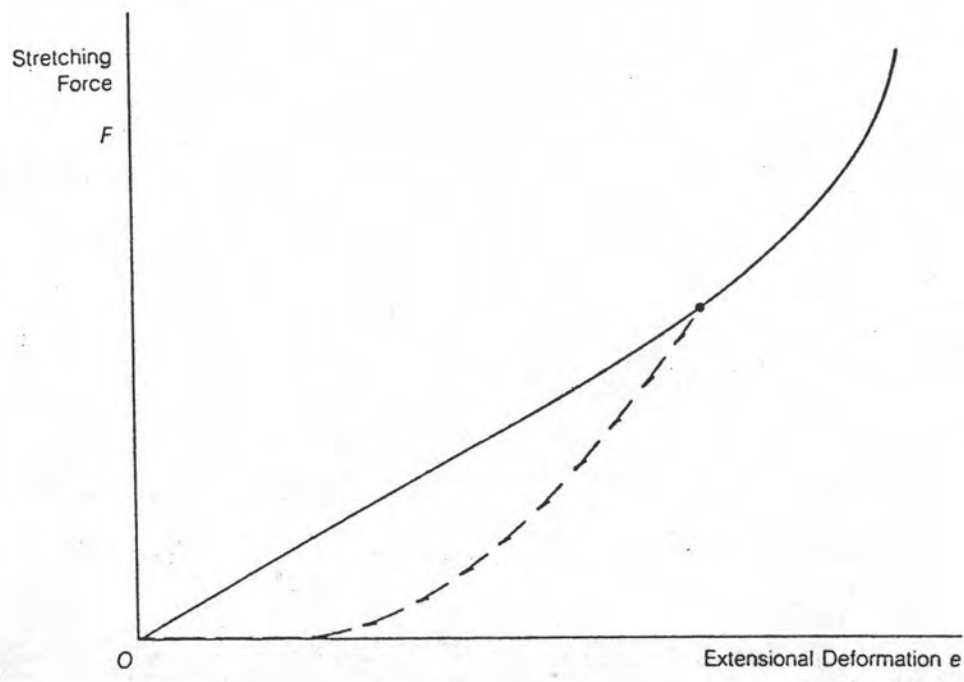


รูปที่ 12 แสดงการกระตุ้น (Activation) พลาสติกโมดูล ซึ่งกระทำโดยการยืดออก พบว่า
วัสดุมีการผิดรูปเป็นระยะทาง e (19)

ปลายด้านหนึ่งของโมดูลถูกยึดอยู่กับที่ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะถูกดึง ทำให้โมดูลยืดยาว
ออก

การผิดรูป (Deformation, e) คำนวณได้จากความยาวที่ยืดแล้ว (L) ลบความยาว
เริ่มต้น (L_0)

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงค้ำการผิดรูปของพลาสติกโมดูล แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต่อการผิดรูปของพลาสติกโมดูล (19)

จากรูป เส้นทึบ แสดงการเพิ่มแรงดึงจนกระทั่งโมดูลขาด เส้นทึบช่วงแรกที่เป็นเส้นตรง เป็นผลจากการคลายความม้วนงอ (Uncoil) ของส่วน Soft segment

เมื่อส่วน Soft segment คลายความม้วนงอหมดแล้ว วัสดุจะมีความแข็งดึง (Stiffness) เพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะประจุมุมเริ่มถูกยืดออก เมื่อเพิ่มแรงดึงในช่วงนี้ ความลาดชันของกราฟจะเพิ่มมากขึ้น จนถึงจุดที่โมดูลขาด

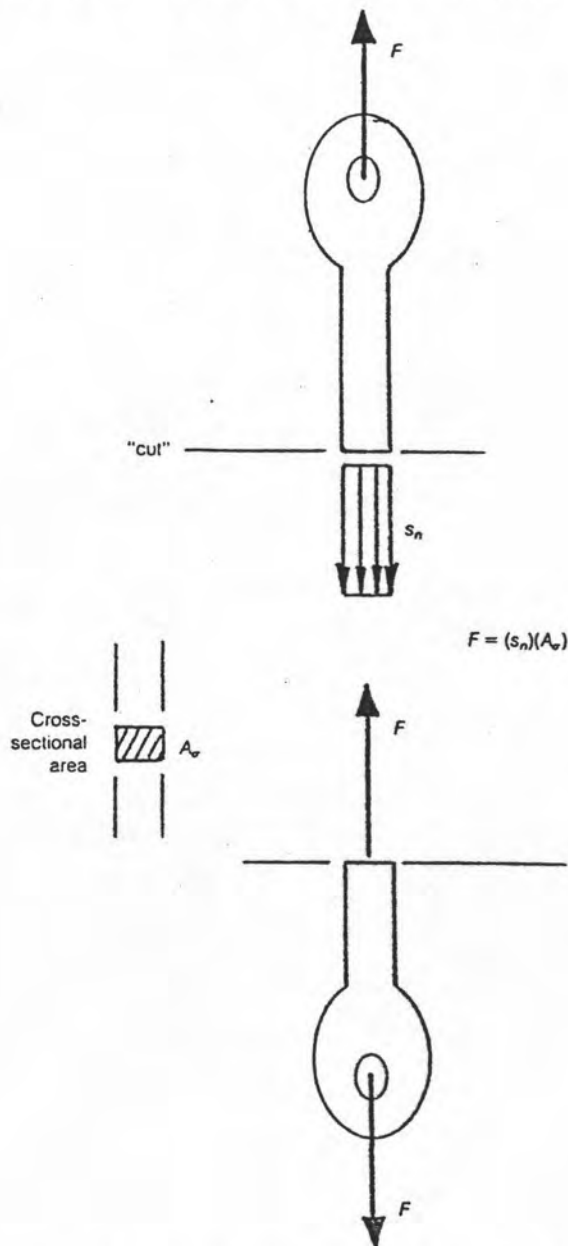
เส้นประ แสดงการสูญเสียแรง (Unloading) อย่างรวดเร็วของโมดูล การถอนแรงจากจุดที่ต่ำกว่าขีดจำกัดยืดหยุ่น (Elastic limit) จะพบว่าวัสดุยังมีการผิดรูปเหลืออยู่ทันทีที่ถอนแรงที่ Activate ออกไป แต่ถ้าทิ้งไว้เวลาผ่านไปนาน ๆ โมดูลจะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมก่อนให้แรงได้ เนื่องจากมีการสร้างพันธะทุติยภูมิกลับคืนมาใหม่

จากรูปนี้ ยังไม่สามารถแสดงการสูญเสียแรงได้อย่างแท้จริง เนื่องจากแรงที่ได้จากโมดูล นอกจากจะขึ้นกับระยะทางที่วัสดุถูกยืดแล้ว ยังขึ้นกับระยะเวลาที่ผ่านไปด้วย

ความเค้นเชิงกล (Mechanical Stress) (19)

ความเค้น (24) หมายถึง แรงต้านทานภายในที่เกิดขึ้นภายในของวัสดุใดวัสดุหนึ่ง
เมื่อมีน้ำหนักหรือแรงดึงหรือแรงอัด หรือแรงอื่น มากระทำบนวัสดุนั้น

ค่าของความเค้น วัสดุได้จากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่ที่วัสดุนั้นถูกกระทำ
ความเค้นที่เกิดขึ้นเมื่อพลาสติกโมดูลถูกยึด เรียกว่า ความเค้นแบบดึง (Tensile
Stress) (19) หมายถึง แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เกิดขึ้นในวัสดุ เพื่อด้านทานต่อแรงภายนอก
ที่มากระทำทำให้วัสดุนั้นยืด ความเค้นแบบดึงนี้จะเกิดขึ้นบนพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับแนวแรง ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในพลาสติกโมดูล เมื่อวัสดุถูกยึด (19)

การคำนวณความเค้น ต้องอาศัยเส้นตัดจินตภาพ (Imaginary Cut) ซึ่งตั้งฉากกับ
แนวแรง

$$\text{ค่าความเค้นแบบดึง (S)} = \frac{F}{A}$$

S = ความเค้น

F = แรงดึง

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของ เส้นตัดจินตภาพ

หน่วย เป็นแรงต่อพื้นที่ เช่น กรัมต่อตารางมิลลิเมตร

ความเครียด (Strain) (19)

ความเครียด (24) เป็นภาวะของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงทางความยาว เมื่อมีน้ำหนัก
หรือแรงมากระทำบนวัสดุนั้น

ค่าของความเครียด เป็นอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงต่อความยาว เดิม
ดังนั้นความเครียดจึงไม่มีหน่วย

ความเครียดที่เกิดขึ้น เมื่อพลาสติกโมดูลถูกยืด เรียกว่า ความเครียดแบบดึง
(Tensile Strain) (19)

$$\text{ค่าความเครียดแบบดึง } \epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$$

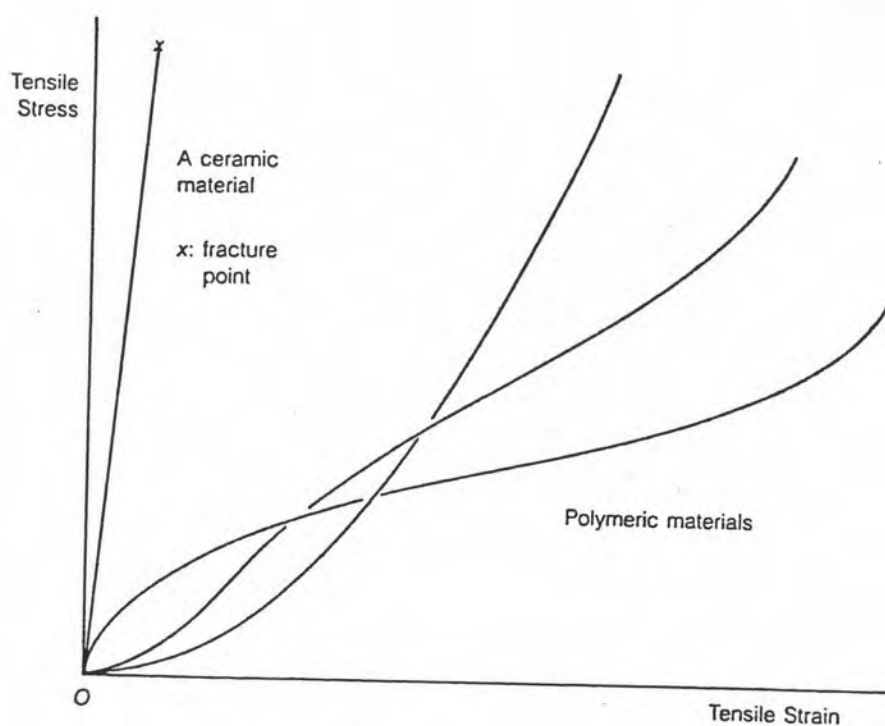
โดย ϵ = ความเครียด

L_0 = ความยาวเริ่มต้น

L = ความยาวเมื่อวัสดุถูกยืดแล้ว

จากคำจำกัดความของความเค้นและความเครียด จะเห็นได้ว่าเป็นการคำนวณแรง
(Force) , และการผิดรูป (Deformation) ที่เกิดขึ้นภายนอกวัสดุ ให้เป็นความเค้น
(Stress) , และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ดังนั้นลักษณะของไดอะแกรม
แสดงแรงต่อการผิดรูป จึงมีลักษณะเดียวกับไดอะแกรมแสดงความเค้นต่อความเครียดของวัสดุ
เดียวกัน

รูปที่ 15 เป็นไดอะแกรมแสดงความเค้นต่อความเครียดแบบดึงของ เซรามิกและ
พอลิเมอร์



รูปที่ 15 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่อความเครียดของพอลิเมอร์ (19)

จากไดอะแกรมแสดงความเค้นต่อความเครียดของพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 15 จะทำให้ได้คุณสมบัติเชิงกลดังนี้

1. ขีดจำกัดยืดหยุ่น (19, 24) (Elastic limit) เป็นขีดจำกัดของหน่วยแรงสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ โดยไม่เกิดการผิดรูปถาวร

จากไดอะแกรม ขีดจำกัดยืดหยุ่นคือจุดที่ความลาดชันของกราฟเริ่มเพิ่มขึ้น

2. ความแข็งตึงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (19, 24) (Stiffness per Unit Volume) หรือเรียกว่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) หรือโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) คือคุณสมบัติของวัสดุที่ต้านทานความเค้นที่กระทำต่อวัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร เพื่อไม่ให้เกิดการผิดรูป โดยความเค้นนี้ต้องไม่เกินขีดจำกัดยืดหยุ่นด้วย

$$\begin{aligned} \text{สูตร โมดูลัสยืดหยุ่น} &= \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} \\ &= \text{ความลาดชันของกราฟ} \end{aligned}$$

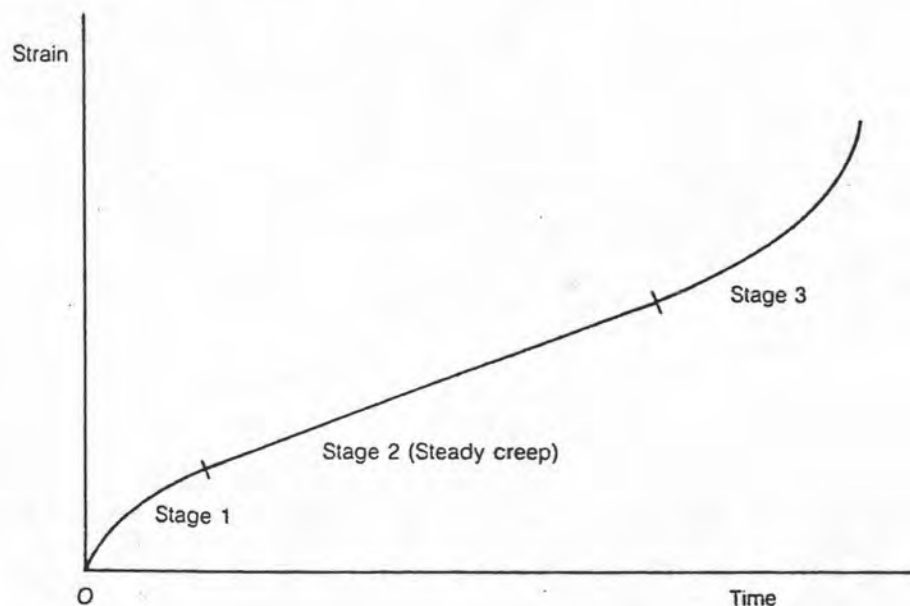
จากกราฟจะเห็นได้ว่า พอลิเมอร์มีความลาดชันไม่คงที่ เนื่องจากกราฟไม่เป็นเส้นตรง ดังนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์จึงมีค่าไม่คงที่

คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ (19) เช่น พลาสติกโมดูล กำหนดจากการทดลอง ไคยยาก เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่อความเครียด เมื่อถูกแรงดึงกระทำเป็นระยะเวลาหนึ่งนั้น จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ถูกต้อง

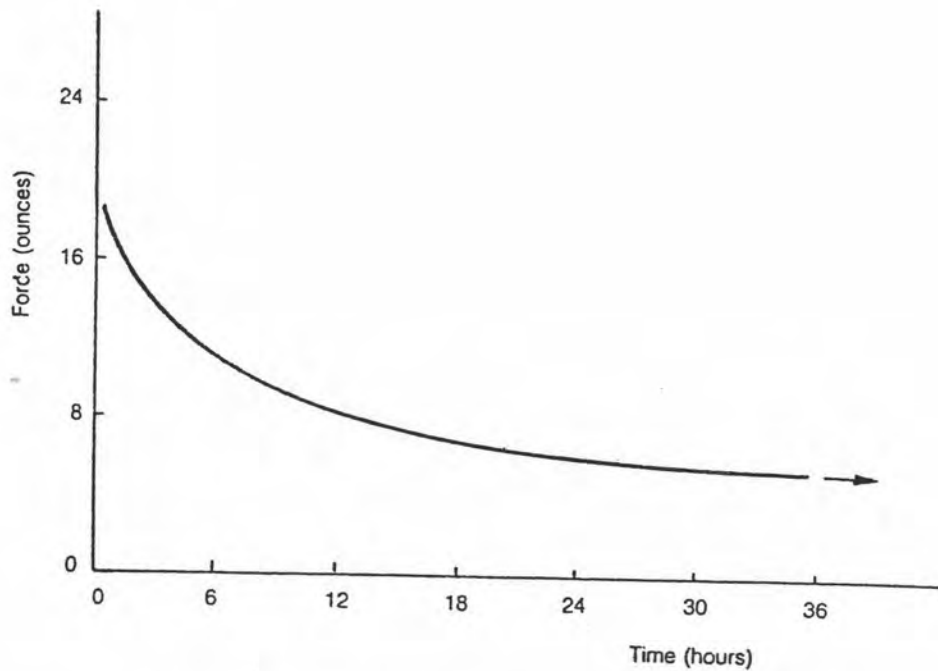
โดยพบว่าเมื่อยืดพลาสติกโมดูลด้วยแรงดึงขนาดปานกลาง และให้แรงดึงนั้นมีขนาดคงที่ แล้ววัดการผิดรูปที่เกิดขึ้น จะพบว่าวัสดุยังมีการยืดยาว (Elongation) อีกอย่างค่อนเนื่อง คุณสมบัตินี้เรียกว่าวัสดุมี "Creep" ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดต่อเวลา ดังรูปที่ 16

Creep หมายถึง การผิดรูปเพิ่มขึ้นของวัสดุ ตลอดเวลาที่ผ่านไป เมื่อวัสดุถูกกระทำด้วยแรงคงที่

วัสดุที่มี Creep จะพบคุณสมบัติอีกอย่างหนึ่ง คือมีการ "Relaxation" ซึ่งหมายถึง การลดลงของแรงตามระยะเวลาที่ผ่านไป เมื่อมีความเครียดคงที่ ดังรูปที่ 17



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดต่อเวลา แสดงให้เห็นการเกิด Creep แบ่งเป็น 3 ระยะ (19)



รูปที่ 17 แสดง Relaxation ของพอลิเมอร์บางชนิด (19)

Relaxation เกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียพันธะทุติยภูมิ เพราะวัสดุถูกดึงให้ยืดออกเป็นระยะเวลาาน ทำให้วัสดุสูญเสียความตึงไป ส่งผลให้แรงที่ได้ลดลง

ขนาดของแรงที่สูญเสียไปขึ้นกับ

1. วัสดุที่ใช้ทำพลาสติกโมดูล
2. ขนาดของแรงเริ่มต้นซึ่งสัมพันธ์กับรูปร่างเดิมของวัสดุ
3. ระยะเวลาที่วัสดุถูกยึด
4. สภาพแวดล้อม พบว่าสารยึดหยุ่นที่ใช้งานภายในช่องปาก เช่น พลาสติกโมดูล

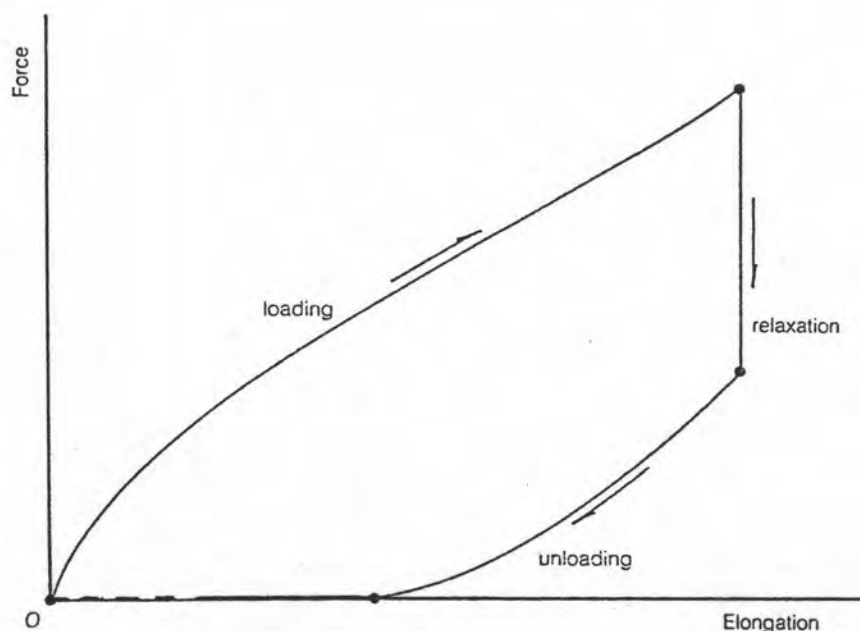
มีการสูญเสียแรงมากกว่าที่ใช้งานนอกช่องปาก

จากรูปที่ 18 เป็นโคอะแกรมแสดงลักษณะของแรงดึงที่ได้จากพลาสติกโมดูลแบ่งได้เป็น 4 ระยะ ดังนี้

ระยะที่ 1 เป็นการให้แรงดึงโมดูลในตอนเริ่มต้น

ระยะที่ 2 แสดง Relaxation ที่เกิดขึ้น เมื่อมีความเครียดคงที่เป็นระยะเวลาหนึ่ง

- ระยะที่ 3 แสดงการสูญเสียแรงอย่างรวดเร็ว เมื่อไม่มีความเค้นกระทำต่อโมดูล
- ระยะที่ 4 โมดูลจะค่อย ๆ คืนสู่ความยาวเดิม ถ้าไม่มีการดึงซ้ำอีก แต่พบว่า พลาสติกโมดูลจะยังมีการผิดรูปหลงเหลืออยู่บ้าง



รูปที่ 18 ไตอะแกรมแสดงลักษณะของแรงดึงที่ได้จากพลาสติกโมดูล แบ่งได้เป็น 4 ระยะ (19)

อิทธิพลของสารเคมีและอุณหภูมิ (Chemical and Thermal Influences) (19)

สภาพแวดล้อมในช่องปาก ได้แก่ ของเหลวในช่องปาก น้ำลาย อาหาร และเครื่องมือที่รับประทาน เศษอาหารที่ติดค้างในช่องปาก จะทำปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุที่ใช้ในการจัดฟันได้ นอกจากนั้นอุณหภูมิในช่องปากซึ่งเปลี่ยนแปลงได้จากอาหารและ เครื่องมือที่รับประทาน ก็ทำให้ วัสดุมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป

ส่วนสภาพแวดล้อมนอกช่องปาก เช่น ช่วงเวลาระหว่างการผลิตและการใช้งาน การเก็บรักษาวัสดุก่อนใช้งาน ก็มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุเช่นกัน อายุการใช้งาน (Shelf Life) ก็จะได้รับผลจากความชื้นและอุณหภูมิสูง การที่เครื่องมือจัดฟันนอกช่องปาก (Extraoral Appliance) สัมผัสกับนม ผิวน้ำนม น้ำมัน หรืออนุภาคต่าง ๆ ที่ล่องลอยอยู่ในอากาศ ก็ส่งเสริมให้วัสดุเสื่อมสภาพได้

การกัดกร่อน (Corrosion) คือการเสื่อมสภาพของวัสดุจากปฏิกิริยาเคมี ส่งผลให้ วัสดุมีสภาพที่มองเห็นได้เปลี่ยนแปลงไป แบ่งได้เป็น

1. การกัดกร่อนแบบแห้ง (Dry Corrosion) เป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีของวัสดุกับ แก๊ส โดยเฉพาะอากาศ สำหรับพลาสติกโมดูล ผลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมอายุเร็วขึ้น (Aging) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ผลของปฏิกิริยาจะ เพิ่มการเชื่อมขวาง (Cross-links) ซึ่งเป็นพันธะทุติยภูมิ ทำให้วัสดุมีความแข็ง (Hardness) ความแข็งตึง และความเปราะ (Brittleness) มากขึ้น

ความร้อน แสงสว่าง ความเค้น และแก๊ซไอโซไซน ทำให้การเสื่อมอายุเร็วขึ้น อาจเติมสารต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidants) เพื่อต่อต้านการเสื่อมอายุ

2. การกัดกร่อนแบบเปียก (Wet Corrosion) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุนั้นสัมผัสกับ ของเหลวหรือความชื้น เช่น น้ำลาย เหงื่อ น้ำมันจากผิวหนัง ทำให้เกิดการเสื่อมอายุเช่นกัน พบว่าสารยึดหยุ่นที่ใช้งานในช่องปากมีการเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ใช้งานนอกช่องปาก ปฏิกิริยา ออกซิเดชันที่เกิดขึ้น ทำให้โมเลกุลยาวสลายตัวเป็นโมเลกุลสั้น ๆ ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง ปฏิกิริยานี้จะดำเนินไปอย่างเชื่องช้า โดยจะพบการเปลี่ยนสี (Discoloration) เป็นตัวชี้ ให้เห็นว่ามีการเริ่มต้นของปฏิกิริยานี้

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อวัสดุ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น ความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิในช่องปาก หรือระหว่างอาหารร้อนและเย็นที่รับประทาน มีผลกระทบต่อ คุณสมบัติของพลาสติกโมดูล โดยส่งเสริมให้เกิดการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาเคมีเร็วขึ้น พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมและโมเลกุลมีความเคลื่อนไหวมากขึ้น คุณสมบัติความแข็งแรงลดลง อัตราเร็วของการเกิด Creep และ Relaxation สูงขึ้น อัตราของการเกิดการกัดกร่อนและ ออกซิเดชันเร็วขึ้น

การตอบสนองของฟันและอวัยวะปริทันต์ต่อแรงกระทำทางทันตกรรมจัดฟัน

ลักษณะของกระดูกเบ้าฟัน (32)

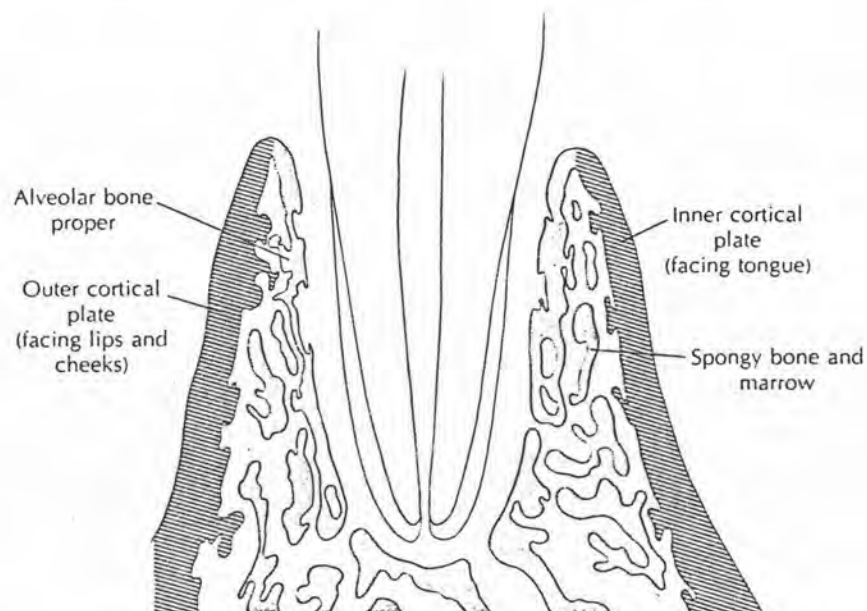
กระดูกเบ้าฟันประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ (รูปที่ 19)

1. กระดูกทึบ (Cortical Plate) แบ่งเป็น กระดูกทึบด้านนอก (Outer Cortical Plate) ซึ่งอยู่ชิดกับด้านริมฝีปากและแก้ม และกระดูกทึบด้านใน (Inner Cortical Plate) ซึ่งอยู่ชิดกับลิ้นหรือเพดานปาก มีลักษณะเป็นกระดูกทึบ

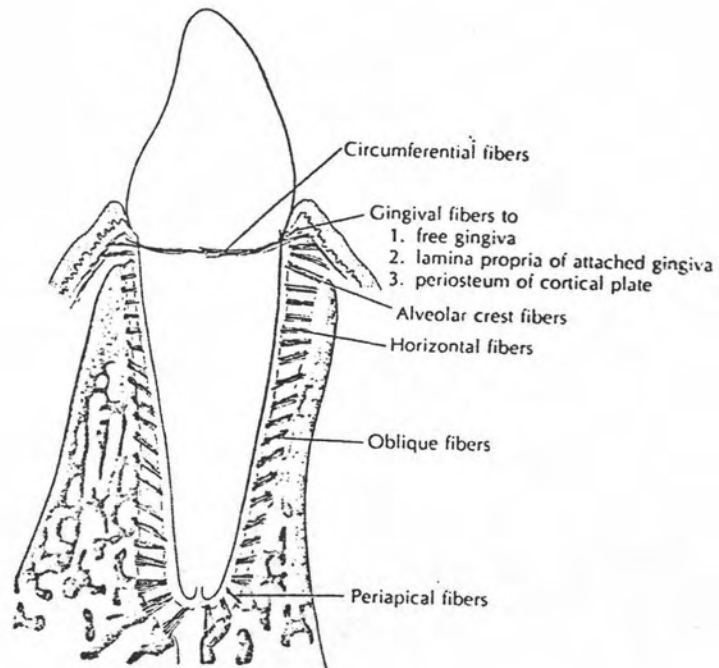
2. ผิวกระดูกเบ้าฟัน (Cribiform Plate, Lamina Dura, Alveolar Bone Proper) เป็นผิวกระดูกที่อยู่ล้อมรอบรากฟัน มีลักษณะทึบ แต่มีรูพรุน เพื่อเป็นทางติดต่อของเส้นเลือดและเส้นประสาทจากกระดูกไปยังเอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal Ligament)

3. กระดูกโปร่ง (Spongy Bone) เป็นกระดูกที่อยู่ระหว่างกระดูกทึบและผิวกระดูกเบ้าฟัน เป็นที่อยู่ของไขกระดูก (Bone Marrow) ซึ่งมีหน้าที่ในการสร้างเม็ดเลือด

เอ็นยึดปริทันต์ (Periodontal Ligament) (21) ประกอบด้วยเส้นใยคอลลาเจน (Collagen Fiber) ยึดระหว่างผิวรากฟัน (Cementum) ไปยังผิวกระดูกเบ้าฟัน (รูปที่ 20)

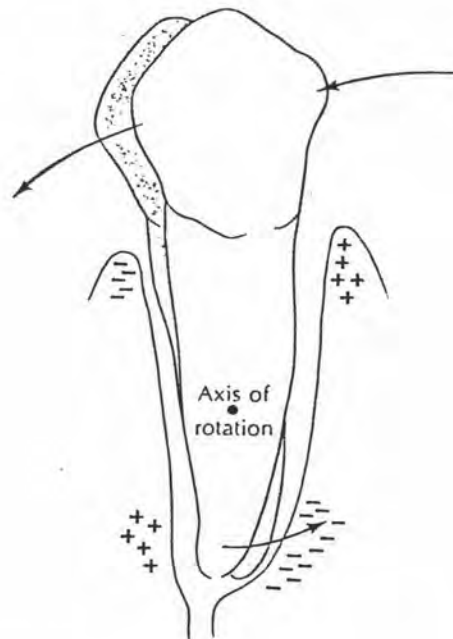


รูปที่ 19 แสดงรากฟันและกระดูกเบ้าฟัน (32)



รูปที่ 20 แสดงเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งแบ่งได้เป็นหลายกลุ่มดังรูป (32)

เมื่อมีแรงกระทำต่อตัวฟัน แรงจะส่งผ่านไปยังรากฟัน ไปยังเอ็นยึดปริทันต์และกระดูกเบ้าฟัน ทำให้เกิดพื้นที่ที่มีแรงกด (Pressure Side) และพื้นที่ที่มีแรงดึง (Tension Side) ขึ้นกับทิศทางของแรงที่กระทำ พื้นที่ที่มีแรงกดจะมีการละลายตัวของกระดูกเบ้าฟัน ส่วนพื้นที่ที่มีแรงดึงจะมีการสร้างกระดูกเบ้าฟัน ทำให้ฟันเคลื่อนที่ไปในกระดูกได้ (33) (รูปที่ 21)



รูปที่ 21 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของกระดูกเบ้าฟัน โดยมีการละลาย (-) และการสร้างกระดูก (+) เมื่อมีแรงกระทำทางทันตกรรมจัดฟันค่อตัวฟัน (32)

ขนาดแรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟันเขี้ยว (Optimum Force for Canine Retraction)

ขนาดแรงที่เหมาะสมในการเคลื่อนฟัน (Optimum Force) (15, 19, 34, 35) ได้แก่ขนาดแรงซึ่งทำให้ฟันเคลื่อนที่ไปตามต้องการอย่างรวดเร็ว โดยผู้ป่วยมีความรู้สึกไม่สบาย และมีอันตรายค่อฟันและอวัยวะปริทันต์น้อยที่สุด

Storey และ Smith (16) ได้ทำการทดลองดึงฟันเขี้ยวถอยหลังไปในช่องว่างที่เกิดจากการถอนฟันกรามน้อยซี่ที่หนึ่ง พบว่าแรงที่พอเหมาะในการเคลื่อนฟันเขี้ยวแบบบอลิติได้เร็วที่สุดมีอันตรายค่อฟันและอวัยวะปริทันต์น้อยที่สุด ควรมีขนาด 150-200 กรัม ขนาดแรงที่ต่ำกว่านี้ ฟันเขี้ยวจะไม่เคลื่อนที่ แต่ถ้าเพิ่มขนาดแรงให้สูงกว่านี้ อัตราการเคลื่อนของฟันเขี้ยวจะลดลง และฟันหลัก (Anchorage) จะเคลื่อนมาด้านหน้า

Reitan (17) กล่าวว่า แรงที่ใช้เคลื่อนฟันเขี้ยวบนแบบบอลิติ (Bodily Movement) มีขนาด 150-250 กรัม ส่วนฟันเขี้ยวล่างมีขนาด 100-200 กรัม

การเลือกขนาดแรงเริ่มต้น (19)

การเลือกขนาดแรงเริ่มต้น ต้องคำนึงถึงรูปแบบของการลดลงของแรงตามระยะเวลาของเครื่องมือที่เลือกใช้ นอกจากนั้นควรมีขนาดมากพอที่จะทำให้แรงที่หลงเหลืออยู่หลังจากมีการเคลื่อนที่ของฟันผ่านช่อง เอ็นยึดปริทันต์แล้ว มีขนาดเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของฟันต่อไปได้ตลอดช่วงเวลาก่อนที่จะถึงวันนัดครั้งต่อไป อย่างไรก็ตามขนาดของแรงนั้นก็ไม่ควรมากเกินไปจนทำให้เกิดความเจ็บปวด หรืออันตรายต่อฟันและอวัยวะปริทันต์ได้ นอกจากนั้นขนาดแรงก็ไม่ควรมากจนทำให้ฟันหลักเคลื่อนที่ด้วย

ลักษณะของแรงที่ได้จากพลาสติกโมดูล เป็นแรงชนิด Continuous Force ซึ่งหมายถึงแรงทางทันตกรรมจัดฟัน ซึ่งไม่ลดลงถึงศูนย์ระหว่างช่วงวันนัด มักจะเกิดจากเครื่องมือที่มีความสามารถในการคืนตัวสูง การดึงโมดูลให้ยึด (Activate) จะไม่กระทำให้เกิดแรงสูงนักเพื่อไม่ให้กีดเส้นเลือดในเอ็นยึดปริทันต์ จนทำให้ขนส่งอาหารไปให้เนื้อเยื่อไม่ได้ แรงชนิดนี้จะไม่มีช่วงพัก (Rest Period) ดังนั้นจะพบการรบกวนต่อขบวนการทางชีววิทยาของเนื้อเยื่อเหล่านี้ได้บ้าง

อัตราเร็วของการเคลื่อนฟัน (36)

อัตราเร็วของการเคลื่อนฟันขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ

1. ขนาดแรง ทั้งแรงน้อยและแรงมาก ทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้ทั้งนั้น Burstone (34) กล่าวว่า ในช่วงแรงน้อย (น้อยกว่า 75 กรัม) การเพิ่มขนาดแรงจะทำให้ฟันเคลื่อนได้เร็วขึ้น ส่วนในช่วงแรงมาก (มากกว่า 150 กรัม) การเพิ่มขนาดแรง จะทำให้ฟันเคลื่อนช้าลงในตอนแรก เพราะกระดูกเบ้าฟันจะมีการละลายตัวแบบทางอ้อม ซึ่งส่งผลให้ช่วง Lag Period นานขึ้น จากนั้นฟันจะเคลื่อนอย่างรวดเร็วไปในช่องว่างที่กระดูกเบ้าฟันละลายตัวในช่วงต่อมา ดังนั้นช่วงแรงชนิด Continuous จากน้อยไปมาก สามารถทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วทั้งนั้น

2. อายุ ในผู้ใหญ่ กระดูกมีความหนาแน่นมากกว่าในเด็ก ทำให้อัตราเร็วของการเคลื่อนฟันช้ากว่า

3. ความแตกต่างในแต่ละบุคคล เป็นความแตกต่างในแง่การตอบสนองต่อแรงที่มากกระทำ ซึ่งขึ้นกับความหนาแน่นของกระดูกเบ้าฟัน ในบางคนมีส่วนที่เป็นกระดูกโปร่งมาก ส่วนบางคนมีกระดูกทึบมาก แต่มีกระดูกโปร่งน้อย ทำให้ฟันเคลื่อนได้ช้า

อย่างไรก็ตามในการเคลื่อนฟันก็นิยมใช้แรงน้อย เพราะแรงมากจะทำให้เกิดผลข้างเคียงที่ไม่ต้องการหลายประการคือ (37)

1. การควบคุมฟันหลัก (Anchorage Control) กระทำได้ยากขึ้น อาจมีการสูญเสียตำแหน่งฟันหลัก ซึ่งไม่ต้องการให้เคลื่อนที่
 2. การควบคุมฟันที่ต้องการเคลื่อน กระทำได้ยากขึ้นเช่นกัน เนื่องจากลวดที่ใช้ในการจัดฟันแบบติดแน่นมีความแข็งดิ่งไม่เพียงพอ ทำให้ฟันเกิดการเคลื่อนที่แบบทipping (Tipping Movement)
 3. แรงมากทำให้ฟันโยก, อัตราเสี่ยงต่อการละลายตัวของรากฟัน (Root Resorption) และอันตรายต่อเนื้อเยื่อในโพรงประสาทฟัน (Pulp Tissue) เพิ่มขึ้น
- รูปแบบของการเคลื่อนฟันเมื่อได้รับแรง (15, 19, 34)

การเคลื่อนที่ของฟันเมื่อได้รับแรงแบ่งได้เป็น 3 ระยะ ดังรูปที่ 22

ระยะที่ 1 เรียกว่า Initial Phase เมื่อมีแรงกระทำต่อฟัน ฟันจะเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้น ๆ ทันทีเมื่อได้รับแรงจนถึง 2-3 วันต่อมา เกิดขึ้นเนื่องจากฟันเคลื่อนผ่านช่องเอ็นยิดปริทันต์ (Periodontal Space) กระดูกเข้าฟันอาจมีการผิดรูปเพียงเล็กน้อย จากการทดลองพบว่า แรงน้อยและแรงมากจะเคลื่อนฟันได้เป็นระยะทางเท่ากัน

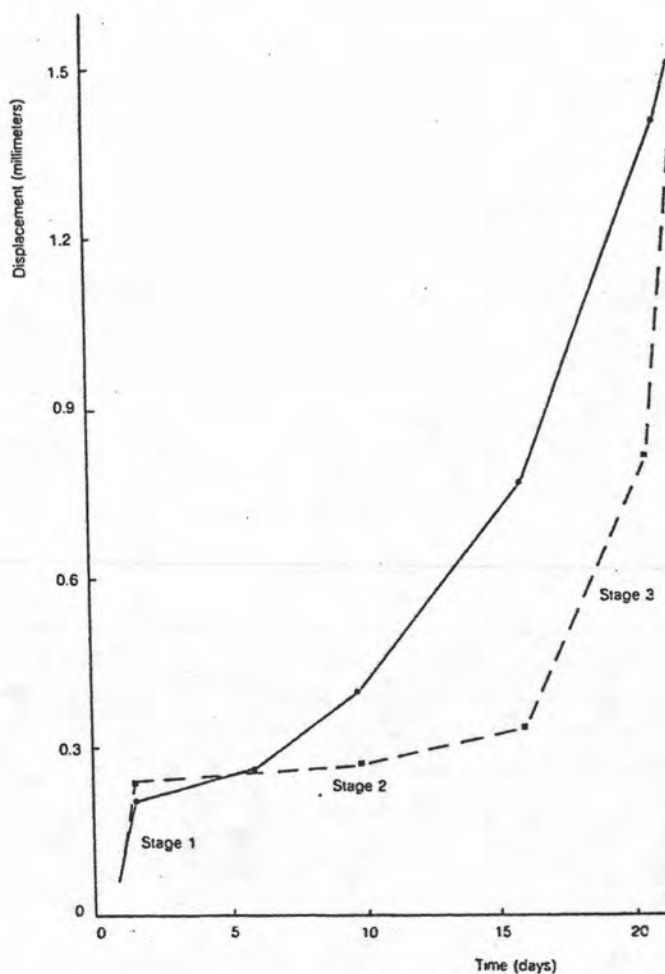
ระยะที่ 2 เรียกว่า Lag Phase ฟันจะเคลื่อนต่อไปเพียงเล็กน้อยหรือไม่เคลื่อนเลย อธิบายได้ว่าระยะนี้เป็นช่วงเวลาที่ผิวกระดูกเข้าฟัน (Alveolar Bone Proper, Lamina Dura) เกิดการละลายตัว โดยอาจเป็นการละลายทางตรง (Direct, Frontal Resorption) หรือการละลายตัวทางอ้อม (Indirect, Undermining, Rear Resorption) ระยะนี้อาจนานหลายวัน จนถึงหลายสัปดาห์ ขึ้นกับขนาดแรงที่ใช้ พบว่าแรงน้อยซึ่งทำให้เกิดการละลายโดยตรง จะกินเวลาประมาณ 4-7 วัน แต่แรงมากซึ่งทำให้เกิดการละลายตัวทางอ้อม จะกินเวลาประมาณ 2 สัปดาห์

ระยะที่ 3 เรียกว่า Post Lag Phase ฟันจะเคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็ว และได้ระยะทางมาก เนื่องจากผ่านเข้าไปในช่องที่กระดูกเข้าฟันละลายตัว ระยะทางที่ฟันเคลื่อนที่ได้จะขึ้นกับวิธีที่กระดูกเข้าฟันละลาย ถ้าเป็นการละลายทางตรง (Direct Resorption) ซึ่งเป็นการละลายที่เริ่มจากผิวกระดูกเข้าฟันซึ่งอยู่ชิดกับเอ็นยิดปริทันต์ ฟันจะเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้น ๆ

และรอจนกระดูกส่วนต่อไปละลายตัว พันจึงจะเคลื่อนต่อไปอีก ขบวนการนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งแลดูคล้ายกับว่าพันเคลื่อนที่อย่างค่อเนื่อง โดยไม่เห็นขอบเขตที่ชัดเจนระหว่างระยะที่ 2 และ 3

ส่วนการละลายตัวทางอ้อม (Indirect Resorption) ซึ่งเป็นการละลายตัวที่เริ่มจากกระดูกโปร่ง (Spongy Bone) ออกไปหาผิวกระดูกเข้าพัน จึงกินเวลานานกว่าผิวกระดูกเข้าพันจะละลาย เมื่อผิวกระดูกเข้าพันละลาย พันจะเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วได้เป็นระยะทางที่ยาว เนื่องจากมีช่องว่างในกระดูกมาก

จากรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของฟันเขี้ยวถอยหลังด้วยแรง 2 ขนาด คือ แรงน้อย 60 กรัม และแรงมาก 150 กรัม ทำให้ฟันเขี้ยวเคลื่อนที่ได้เท่าเทียมกันคือ ประมาณ 1.5 มิลลิเมตร เมื่อครบ 3 สัปดาห์



รูปที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่ฟันเคลื่อนที่กับเวลาที่ผ่านไป ตลอดช่วงเวลา 3 สัปดาห์ โดยแรง 2 ขนาด เส้นทึบแสดงขนาดแรง 60 กรัม เส้นประแสดงขนาดแรง 150 กรัม (19)

การศึกษาเกี่ยวกับการลดลงของแรงในพลาสติกโมดูล

Andreasen และ Bishara (8) สังเกตในทางคลินิก พบว่า พลาสติกโมดูลมีประสิทธิภาพดีในการปิดช่องว่างเล็ก ๆ ที่มีอยู่ทั่วไปในขากรรไกร แต่จะมีประสิทธิภาพน้อยลงเมื่อนำมาใช้ในการค้ำฟันเขี้ยวถอยหลัง

นอกจากนั้นยังพบว่า เมื่อใช้พลาสติกโมดูลปิดช่องว่างเป็นเวลา 3 ถึง 4 สัปดาห์แล้ว โมดูลจะเกิดการยึดตัวอย่างถาวรเป็นระยะทางหนึ่ง โดยมีแรงหลงเหลืออยู่น้อยมาก และเกิดการเปลี่ยนสี

เขาจึงได้ศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดจากพลาสติกโมดูล เปรียบเทียบกับอีลาสติค เมื่อใช้เลียนแบบการค้ำฟันจากพันกรามข้างหนึ่งไปยังพันกรามอีกข้างหนึ่งในขากรรไกรเดียวกัน เป็นเวลา 3 สัปดาห์

วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่

1. อีลาสติค ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $\frac{5}{8}$ และ $\frac{3}{4}$ นิ้ว จากบริษัท 3 แห่ง
2. พลาสติกโมดูลขนาดมาตรฐานและขนาดใหญ่แรงมาก จากบริษัท Unitek

ทำการศึกษานำร่องถึงสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน 6 ชนิด เพื่อเลียนแบบสภาวะในช่องปากคือ

1. วัสดุแห้งที่อุณหภูมิห้อง
2. วัสดุแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง
3. วัสดุแช่ในน้ำลายสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง
4. วัสดุแห้งที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส
5. วัสดุแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส
6. วัสดุแช่ในน้ำลายสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

พบว่าอีลาสติคแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง และพลาสติกโมดูลแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ให้แรงที่ไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการแช่ในน้ำลายสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ระยะทางที่ใช้ในการทดลองได้จากการศึกษาในผู้ป่วยที่ไม่ได้รับการถอนฟัน เพื่อจัดฟันจำนวน 30 คน โดยจัดเป็นค่าความยาวขากรรไกรที่ยาวที่สุด และผู้ป่วยที่ถอนฟันเพื่อการจัดฟัน

จำนวน 30 คน เพื่อเป็นค่าความยาวขากรรไกรที่สั้นที่สุด โดยวัดระยะทางจากด้านใกล้กลางของ ฟันกรามซี่ที่หนึ่งของด้านหนึ่ง ไปยังอีกด้านหนึ่ง ได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็นระยะทาง 105 มิลลิเมตร และ 65 มิลลิเมตร ตามลำดับ

นำวัสดุทั้งสองชนิดมาซึ่งบนโครงลวด ทำให้ยึดออกเป็นระยะทางต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 65, 75, 85, 95 และ 105 มิลลิเมตร ระยะทางละ 10 ตัวอย่าง แล้วนำโครงลวดซึ่งมี อีลาสติกที่ยึดอยู่นั้นแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ส่วนพลาสติกโมดูลที่ยึดบนโครงลวดจะแช่ในน้ำที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องมือวัดแรงทางทันตกรรมจัดฟันที่เรียกว่าคอเรกซ์ เกจ (Correx Gauge) วัดแรงเป็นช่วง ๆ 7 ครั้งใน 3 สัปดาห์ คือ ตอนเริ่มต้น, 1, 8, 24 ชั่วโมง, 1, 2 และ 3 สัปดาห์

คำนวณแรงที่วัดได้ในแต่ละช่วงให้เป็นร้อยละ ของแรงเริ่มต้น แล้วหาค่าเฉลี่ยและ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่วัดได้ในแต่ละช่วง และของแรงที่คำนวณเป็นร้อยละ ของแรง เริ่มต้นแล้ว

จากการศึกษานำร่อง (Pilot Study) พบปรากฏการณ์ 3 ประการ เกิดขึ้นทั้ง อีลาสติกและพลาสติกโมดูล คือ

1. ทั้งคู่มีการติดสีจากน้ำลาย
2. ไม่ว่าจะอยู่ในสภาพแวดล้อมใด ๆ แรงจะลดลงมากที่สุดภายใน 24 ชั่วโมงแรก
3. ความเปียก ไม่ว่าจะป็นน้ำหรือน้ำลาย ทำให้แรงลดลงมากกว่าวัสดุแห้ง

สรุปผลจากการศึกษาครั้งนี้ว่า

1. พลาสติกโมดูลมีการเปลี่ยนแปลงความยาว โดยเกิดการยืดยาวอย่างถาวรมากกว่า อีลาสติก โดยพบการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรนี้ตั้งแต่เริ่มต้นยึดวัสดุ และจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา ถ้าวัสดุถูกยึดในตอนเริ่มต้น เป็นระยะทางที่สั้นลง อัตราร้อยละของการเปลี่ยนแปลงนี้จะน้อยลงด้วย
2. พบว่ามีการลดลงของแรงอย่างรวดเร็วในวันแรก โดยพลาสติกโมดูลจะมีแรง หลงเหลืออยู่ร้อยละ 25 ส่วนอีลาสติกขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $\frac{5}{8}$ นิ้ว จะมีแรงหลงเหลืออยู่ร้อยละ 58 และ 57 ของแรงเริ่มต้น ตามลำดับ

3. เมื่อคำนวณอัตราการลดลงของแรงเป็นร้อยละ ต่อ 1 หน่วยเวลา พบว่าเกิดขึ้นสูงสุดใน 1 ชั่วโมงแรก โดยพลาสติกจะมีอัตรานี้ร้อยละ 55.7 ส่วนอีลาสติกขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว และ $\frac{5}{8}$ นิ้ว จะมีอัตรานี้ร้อยละ 26.4 และ 28.3 ตามลำดับ

4. พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน แรงที่หลงเหลืออยู่ตลอดช่วง 3 สัปดาห์ ของวัสดุ ทั้ง 2 ชนิด ค่อนข้างคงที่

5. พลาสติกโมดูลชนิดให้แรงมาก จะให้แรงเริ่มต้นที่สูงกว่าชนิดมาตรฐาน แต่จะมีอัตราการลดลงของแรงที่มากกว่า จนกระทั่งแรงที่ได้ต่ำกว่าชนิดมาตรฐานภายใน 8 ชั่วโมง

6. ข้อดีข้อหนึ่งของพลาสติกโมดูลคือ ทันตแพทย์จัดฟันแน่ใจได้ว่าจะมีแรงกระทำต่อฟันที่ต้องการเคลื่อนตลอดเวลา เพราะทันตแพทย์เองเป็นผู้ใส่บนแบรคเกต ในขณะที่การใช้อีลาสติก ผู้ป่วยจะเป็นผู้ถอดใส่เอง จึงอาจจะไม่ใส่ตามที่กำหนดได้

7. จากข้อมูลที่ได้ จึงแนะนำให้เลือกพลาสติกโมดูลที่ให้แรงเริ่มต้นเป็น 4 เท่าของแรงที่ต้องการ เพราะหลังจากวันแรก แรงจะลดลงเหลือประมาณ 1 ใน 4 ของแรงเริ่มต้น ส่วนอีลาสติก ควรเลือกใช้ที่ให้แรงเริ่มต้นเป็น 2 เท่า เพราะจะเกิดการลดลงของแรงเหลือประมาณครึ่งหนึ่ง หลังจากวันแรกผ่านไป

ต่อมาในปีเดียวกันนี้เอง Andreasen และ Bishara (18) ก็ได้เสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับอีลาสติกและพลาสติกโมดูลอีก 1 เรื่อง โดยมีจุดประสงค์ที่จะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดจากวัสดุทั้งสอง เมื่อใช้ดึงระหว่างขากรรไกรบนและขากรรไกรล่าง ในผู้ป่วยที่มีการสบฟันประเภทที่สองและสาม (Class II and Class III Traction) ในช่วงเวลา 3 สัปดาห์

วัสดุที่ใช้ในการทดลองได้แก่

1. อีลาสติก จากบริษัท 2 แห่ง 4 ขนาด ดังนี้

1.1 ขนาด $\frac{3}{16}$ นิ้ว ซึ่งให้แรง 250-400 กรัม จากบริษัท Ormco

1.2 ขนาด $\frac{4}{16}$ นิ้ว ซึ่งให้แรง 160-300 กรัม จากบริษัท Rocky Mountain

1.3 ขนาด $\frac{5}{16}$ นิ้ว ซึ่งให้แรง 100-180 กรัม จากบริษัท Ormco

1.4 ขนาด $\frac{6}{16}$ นิ้ว ซึ่งให้แรง 70-120 กรัม จากบริษัท Ormco

2. พลาสติกโมดูลจากบริษัท Unitek 3 ขนาด ดังนี้

2.1 ขนาดมาตรฐาน K1 (Standard K1)

2.2 ขนาดแรงมาก K2 (Heavy K2)

2.3 ขนาดมาตรฐาน K3 (Standard K3)

ระยะทางที่ใช้ในการทดลองคือ 22, 28, 34 และ 40 มิลลิเมตร เนื่องจากพิจารณาว่าค่า 22 และ 40 มิลลิเมตร เป็นค่าต่ำสุดและสูงสุดที่วัสดุถูกยึดได้ในสภาพการใช้งานจริง

อีลาสติกจะถูกนำมาซึ่งบนโครงอะลูมิเนียม ซึ่งทำเป็นชั้น ๆ มีระยะทาง 22, 28, 34 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ แต่ละชั้นจะซึ่งอีลาสติก 10 ชั้น ส่วนพลาสติกโมดูลจะถูกซึ่งบนโครงเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งมีลักษณะเดียวกัน อีลาสติกจะถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง และพลาสติกโมดูลจะถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตลอดจนการทดลองเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ใช้คอเรกซ์ เกจ เป็นเครื่องมือวัดแรง วัดแรง 7 ครั้ง ดังนี้คือ ตอนเริ่มต้น, 1 นาที, 1 ชั่วโมง, 1, 2 และ 3 สัปดาห์

สรุปผลจากการศึกษาได้ว่า

1. วัสดุทั้งสองมีการลดลงของแรงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โดยอีลาสติกจะมีแรงลดลงร้อยละ 10 ส่วนพลาสติกโมดูลลดลงร้อยละ 45.3 เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน อีลาสติกจะให้แรงลดลงร้อยละ 17.2 ส่วนพลาสติกโมดูลลดลงร้อยละ 54.7 เมื่อครบ 3 สัปดาห์แล้ว อีลาสติกจะมีแรงหลงเหลืออยู่ร้อยละ 74.9 ส่วนพลาสติกโมดูลจะมีแรงหลงเหลืออยู่ร้อยละ 32.5

การลดลงของแรงนี้ทำให้อธิบายได้ว่า ทำไมฟันจึงไม่เคลื่อนที่ตามที่ต้องการ ทั้งนี้เพราะว่า แรงที่เหลืออยู่มีขนาดไม่เพียงพอที่จะทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้

2. เนื่องจากพลาสติกโมดูลมีการลดลงของแรงอย่างมาก ดังนั้นหากแก้ไขโดยการใช้แรงในตอนเริ่มต้นขนาดสูง ก็อาจทำให้ผู้ป่วยรู้สึกไม่ค่อยสบายนักใน 2-3 ชั่วโมงแรก แต่เมื่อมีการลดลงของแรงแล้ว อาการดังกล่าวก็จะหายไป

3. อีลาสติกจะมีการลดลงของแรงน้อยกว่าพลาสติกโมดูล และนับได้ว่าให้แรงค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงเวลา 3 สัปดาห์

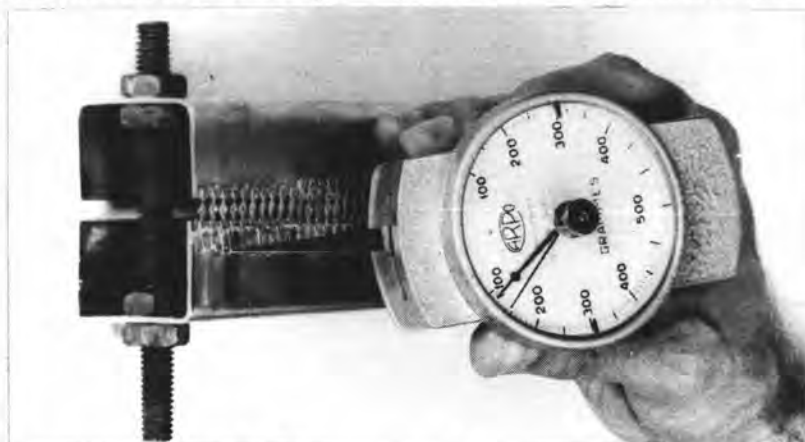
4. วัสดุทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงความยาว โดยเกิดการยืดยาวอย่างถาวร เมื่อถูกยืด โดยพลาสติกโมดูลจะเกิดการยืดยาวอย่างถาวรนี้มากกว่า ค่าของการยืดยาวนี้จะแปรผันตามเวลาที่ผ่านไป และระยะทางที่ใช้ในการยืดวัสดุ ผลของมันทำให้แรงที่ได้จากวัสดุไม่คงที่ เกิดการลดลงของแรงได้

5. วัสดุทั้งสองเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และเปลี่ยนแปลงสภาพที่มองเห็น โดยพบว่า เมื่อการทดลองสิ้นสุดลง อิลาสติคจะเปลี่ยนสีจากค่อนข้างเหลืองอย่างฟางข้าว ไปเป็นสีค่อนข้างขาว ส่วนพลาสติกโมดูลจะมีความโปร่งใส (Transparent) น้อยลง คือทึบแสง (Opaque) มากขึ้น จากการศึกษาข้างก่อน ยังพบว่าวัสดุทั้งสองจะติดสีจากสีใด ๆ ที่มีในน้ำลาย โดยเฉพาะพลาสติกโมดูล

เนื่องจากพลาสติกโมดูลเป็นวัสดุที่ค่อนข้างใหม่ในทางทันตกรรมจัดฟัน โดยเริ่มเป็นที่นิยมใช้ในการเคลื่อนฟันในช่วงปี ค.ศ. 1970 (4) แต่ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติความยืดหยุ่นของมัน ยังไม่เป็นที่เข้าใจนัก การศึกษาของ Andreasen และ Bishara ในปี 1970 (8, 18) และคำอธิบายจากบริษัทผู้ผลิต ให้เพียงความเข้าใจเกี่ยวกับแรงที่ใช้ในการเคลื่อนฟัน ซึ่งเกิดจากการยืดพลาสติกโมดูล นอกจากนั้น Andreasen และ Bishara ได้จำกัดการศึกษาของตนเองเพียงศึกษาถึงแรงเริ่มต้น และอัตราการลดลงของแรงที่เกิดขึ้น เมื่อโมดูลถูกยืดเป็นระยะทางที่คงที่ ซึ่งในทางคลินิกแล้ว ฟันที่ถูกดึงจะไม่อยู่คงที่ แต่จะเคลื่อนไปตามแรงที่มากระทำ ดังนั้น Hershey และ Reynolds (9) จึงได้สนใจศึกษาถึงการลดลงของแรงของพลาสติกโมดูล เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่เลียนแบบการเคลื่อนฟันจริง ๆ

วัสดุและวิธีการ

ใช้โครงเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 23 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการยืดโมดูล



รูปที่ 23 แสดงโครงเหล็กกล้าไร้สนิม และเครื่องมือวัดแรงที่ใช้ในการวิจัย (9)

เครื่องมือนี้ประกอบขึ้นด้วยโครงเหล็กกล้าไร้สนิม มีตะปูเกลียวเป็นตัวแบ่งแยกโครงเหล็กออกเป็น 2 ส่วน และใช้เป็นตัวปรับระยะทางให้โครงเหล็กแยกจากกันได้ตามที่ต้องการเพื่อใช้เลียนแบบการเคลื่อนของฟันเข้าหากัน โดยปรับตะปูเกลียวให้โครงเหล็กเคลื่อนเข้าหากันตามอัตราที่ต้องการ เชื่อมแบริกเกตชนิด Edgewise (Edgewise Bracket) จำนวน 240 อัน ลงบนโครงเหล็ก ข้างละ 120 อัน เพื่อใช้เป็นที่ยึดโมดูล ทำให้ยึดโมดูลได้ครั้งละ 120 ชิ้น ระยะทางระหว่างแบริกเกตมีค่าระหว่าง 12 ถึง 34 มิลลิเมตร โดยเชื่อมแบริกเกตให้มีระยะทางระหว่างกันเท่ากันกลุ่มละ 10 คู่ และเพิ่มระยะทางขึ้นกลุ่มละ 2 มิลลิเมตร

วัสดุที่ใช้ทดลองมีจำนวน 540 ชิ้น จากบริษัท 3 แห่งดังนี้

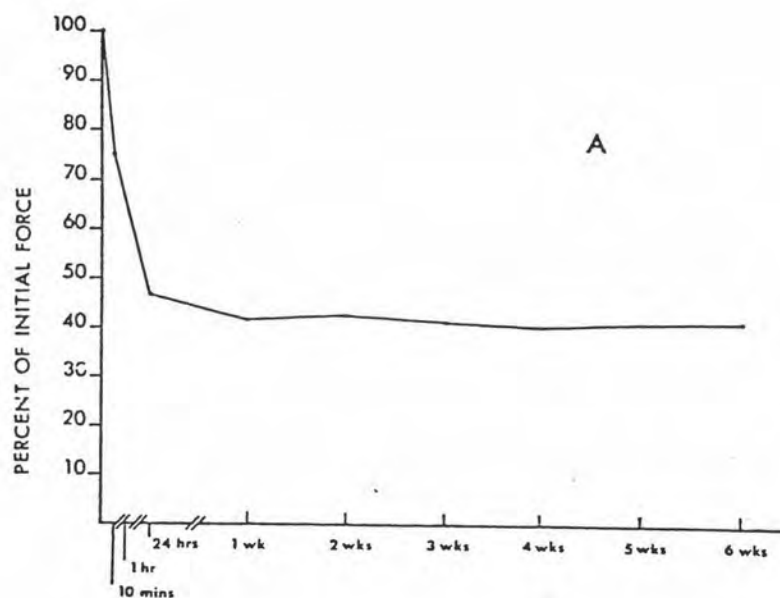
1. Alastik Modules ชนิดใส และชนิดสีเทา (Clear และ Gray Type)
จากบริษัท Unitek

2. Power Chain และ Links จากบริษัทOrmco

3. Elast-O Chain จากบริษัท TP

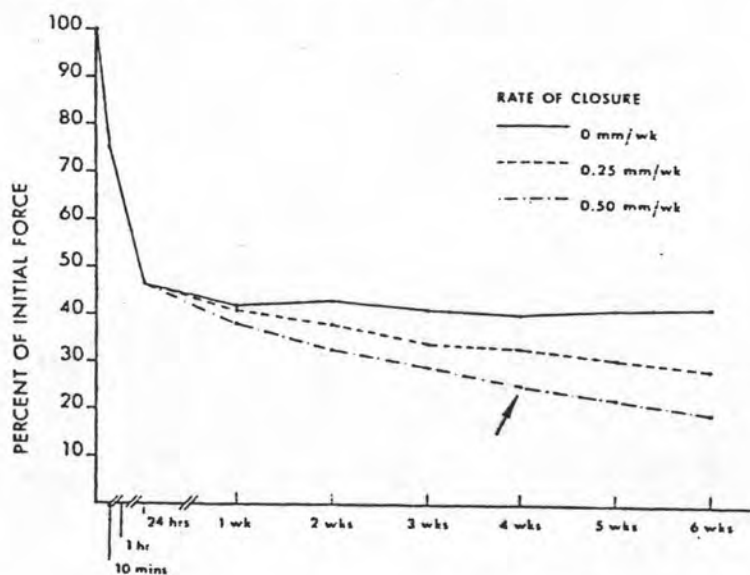
โมดูลจะถูกยึดบนโครงเหล็กครั้งละ 120 ชิ้น แล้วแช่ในน้ำกลั่น (Triple Distilled Water) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตามคำแนะนำของ Andreasen และ Bishara (8) การทดลองจะกระทำโดยให้ระยะทางระหว่างแบริกเกตมีค่าคงที่, ลดลงตามอัตรา 0.25 มิลลิเมตร, และอัตรา 0.50 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ เพื่อเลียนแบบการเคลื่อนฟัน ใช้เครื่องมือวัดแรงที่เรียกว่าคาร์โป เกจ (Carpo Gauge) ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับคอเรกซ์ เกจ ดังรูปที่ 23 วัดแรงเป็นช่วง ๆ 10 ครั้ง ใน 6 สัปดาห์คือ ตอนเริ่มต้นยึดโมดูลบนแบริกเกต, 10 นาที, 1 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง และ 1, 2, 3, 4, 5, 6 สัปดาห์ ทำการทดลองเปรียบเทียบเพื่อประเมินผลของเวลา, การเลียนแบบการเคลื่อนฟัน, แรงเริ่มต้น และความแตกต่างของโมดูลแต่ละบริษัท คำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่วัดได้ในแต่ละช่วง และคำนวณแรงที่วัดได้ในแต่ละช่วงให้เป็นร้อยละ ของแรงเริ่มต้น

1. ประเมินผลของเวลาต่อการลดลงของแรง โดยยึดโมดูลทุกบริษัทบนโครงเหล็ก ซึ่งปรับให้ระยะทางคงที่ตลอดการทดลอง พบลักษณะการลดลงของแรงตามระยะเวลา ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 กราฟแสดงผลของเวลาต่อการลดลงของแรงของพลาสติกโมดูล โดยไม่มีการเคลื่อนที่ แสดงผลเป็นร้อยละของแรงเริ่มต้น (๑)

2. ประเมินผลของการเลียนแบบการเคลื่อนที่ โดยยึดโมดูลทุกบริษัทบนโครงเหล็ก ซึ่งปรับตะปูเกลียวให้ระยะทางระหว่างแบริกเกิดลดลง ด้วยอัตรา 0.25 มิลลิเมตร และ 0.5 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ พบการลดลงของแรง ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 แสดงผลของการเลียนแบบการเคลื่อนที่เข้าหากันด้วยอัตราเร็วต่าง ๆ กัน ลูกศรชี้ แสดงถึง เมื่อเวลาผ่านไป 1 เดือน การเคลื่อนที่เข้าหากันด้วยอัตรา 0.5 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ จะมีแรงหลงเหลืออยู่ร้อยละ 25 ของแรงเริ่มต้น (๑)

3. ประเมินผลของแรงเริ่มต้นต่อการลดลงของแรง โดยแบ่งโมดูลเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ให้แรงมาก (575 กรัม) และกลุ่มที่ให้แรงน้อย (284 กรัม) ใช้อัตราการลดระยะทาง ระหว่างแบร็กเกต 0.5 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแรง จาก 2 กลุ่ม

4. ประเมินความแตกต่างของแรงที่วัดได้จากโมดูลทั้ง 3 บริษัท พบว่ามีความแตกต่าง เพียงเล็กน้อย จนไม่มีความสำคัญในทางคลินิก

สรุปผลจากการศึกษาครั้งนี้ได้ว่า

1. โมดูลทุกบริษัทมีการสูญเสียแรงตามระยะเวลา โดยการสูญเสียเกิดขึ้นมากที่สุด ใน 24 ชั่วโมงแรก ถึงประมาณร้อยละ 50 หลังจาก 4 สัปดาห์ผ่านไป แรงจะเหลือประมาณ ร้อยละ 40 ของแรงเริ่มต้น และค่อนข้างคงที่ไปจนถึง 6 สัปดาห์

2. การเลียนแบบการเคลื่อนพัน จะเพิ่มอัตราการลดลงของแรง ถ้าอัตราการ เคลื่อนพันเป็น 0.25 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ แรงจะหลงเหลือประมาณ 1 ใน 3 ของแรง เริ่มต้น หลังจาก 1 เดือนผ่านไป ถ้าอัตราการเคลื่อนพันเป็น 0.5 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ แรงที่วัดได้ หลังจาก 1 เดือนผ่านไป จะเหลืออยู่ประมาณ 1 ใน 4 ของแรงเริ่มต้น

3. พบว่าลักษณะการลดลงของแรงไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของแรงเริ่มต้น

4. โมดูลจากบริษัท 3 แห่ง ให้แรงที่มีลักษณะการลดลงของแรงคล้ายคลึงกัน และ นับได้ว่ามีความเท่าเทียมกันในทางคลินิก

5. มีความผันแปร (Variability) ของแรงที่ได้จากโมดูล เรียงจากมากไปน้อย ดังนี้คือ Alastik ชนิดใส, Elast-O Chain, Power Chain และ Alastik ชนิดสีเทา ซึ่งพิจารณาจากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงที่วัดได้ ข้อมูลในด้านนี้นำมาใช้ในการเลือก ชื่อโมดูล โมดูลที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย เช่น Power Chain และ Alastik ชนิดสีเทา จะให้แรงที่สม่ำเสมอคล้ายคลึงกันตลอดมวล

6. จากข้อมูลของแรงที่วัดได้ พบว่า พลาสติกโมดูลให้แรงที่มีประสิทธิภาพในการ เคลื่อนพันได้ตลอดช่วง 4 ถึง 6 สัปดาห์

Wong (5) ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดขึ้นของอีลาสติกและพลาสติกโมดูล และความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ของวัสดุทั้งสองชนิด โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษากำลังความแข็งแรงฉีกขาด (Tear Strength) โดยการทดลองที่เรียกว่า Fracture test

2. ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของแรงเมื่อยึดวัสดุออกเป็นระยะทางคงที่

3. ศึกษาความเปลี่ยนแปลงของโมดูลัสยืดหยุ่น

วัสดุที่ใช้

1. $\frac{3}{16}$ นิ้ว Latex Elastic ขนาด $4\frac{1}{2}$ ออนซ์

2. Ormco Power Chain

3. Unitek Alastik C2 Double และ Triple Loop

สภาพแวดล้อมในการทดลองแบ่งเป็น 3 ชนิด

1. แห้ง และไม่ได้จัดกระทำต่อวัสดุ

2. แห้ง และยึดเป็นระยะทาง 17 มิลลิเมตร เป็นเวลา 21 วัน

3. แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และยึดเป็นระยะทาง 17 มิลลิเมตร

เป็นเวลา 21 วัน

พบว่า

1. จาก Fracture Test พบว่า Latex Elastic จะมีความแข็งแรง (Strength) ลดลงหลังจากยึดวัสดุเป็นเวลา 21 วัน ในน้ำ มากกว่า Ormco Power Chain และ Unitek Alastik

2. การลดลงของแรงของ Ormco Power Chain จะเหลือร้อยละ 50 ส่วน Unitek Alastik จะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 27 ในวันแรก หลังจากนั้นก็จะเกิดการลดลงของแรงต่อไปเรื่อย ๆ ด้วยอัตราที่ช้าลง ๆ ในช่วง 21 วัน ส่วน Latex Elastic จะมีแรงหลงเหลืออยู่ถึงร้อยละ 83 ในวันแรก และค่อย ๆ ลดลงจนเหลือร้อยละ 60 เมื่อครบ 21 วัน

3. ทั้ง Latex Elastic, Ormco Power Chain และ Unitek Alastik จะมีโมดูลัสยืดหยุ่นลดลง เมื่อวัสดุถูกแช่ในน้ำ ตลอดการทดลอง มากกว่าวัสดุที่แห้ง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของแรงของ Ormco Power Chain และ Unitek Alastik เกิดขึ้นสูงมาก Wong จึงแนะนำให้พริสเตอร์ช พลาสติกโมดูลเป็นระยะทาง 1 ใน 3 ของความยาวเดิม โดยกล่าวว่าวิธีการนี้จะเพิ่มความแข็งแรงแก่วัสดุ

Kovatch, Lautenschlager, Apfel และ Keller (10) ก็สนใจศึกษาคุณสมบัติของพลาสติกโมดูล เกี่ยวกับลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นเมื่อยึดพลาสติกโมดูลออกเป็นระยะทางต่าง ๆ กัน จนขาด และลักษณะการลดลงของแรงเมื่อยึดโมดูลเป็นระยะทางคงที่ เมื่อใช้อัตราเร็วในการยึดโมดูลต่างกัน

พลาสติกโมดูลที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Unitek K 2 Alastik Module ชนิด Regular

วิธีทดลอง

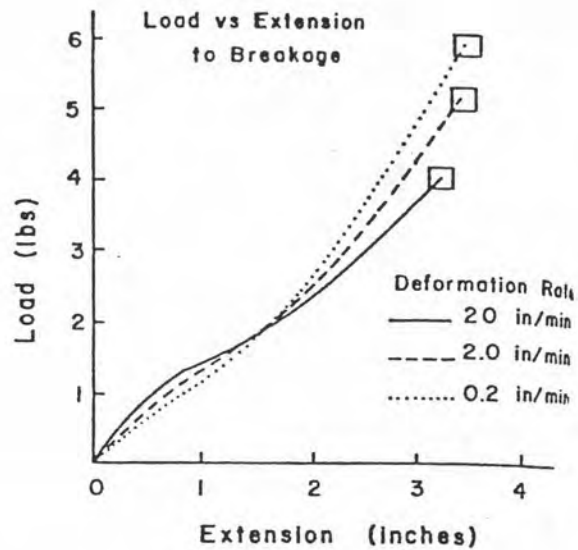
1. การศึกษาการตอบสนองต่อแรง (Loading) และกำลังดึงประลัย (Ultimate Strength) กระทำโดย นำ K2 Alastik ความยาว $\frac{3}{4}$ นิ้ว มายึดที่อุณหภูมิต้องจนขาด ด้วยเครื่อง Instron Machine ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดแรงดึง (Tensile Force) ดึงให้ยึดออกด้วยอัตราเร็ว 0.2, 2 และ 20 นิ้ว ต่อนาที

2. การศึกษาการลดลงของแรง เพื่อนำประโยชน์มาใช้ในทางคลินิก กระทำโดย นำ K2 Alastik ซึ่งแช่ในน้ำลายที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ มายึดที่อุณหภูมิต้อง ด้วยเครื่อง Instron Machine ซึ่งมีกระบอกพลาสติกใส่น้ำลายสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต้องสวมอยู่รอบ ๆ วัสดุที่กำลังทดสอบ ยึดวัสดุให้ยาว 1 นิ้ว ด้วยอัตราเร็ว 3 อัตราเช่นกัน จากนั้นคงความยาว 1 นิ้ว ไว้เป็นเวลาหลายสัปดาห์ วัดแรงที่ลดลงได้ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

กลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มจะมีจำนวนวัสดุที่ทดลองกลุ่มละ 8 ตัวอย่าง

สรุปผลการทดลองได้ว่า

1. Load Extension Curve ดังรูปที่ 26 แสดงให้เห็นว่า แรงที่เกิดจากการยึดโมดูล จะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการยึดโมดูล รวมทั้งปริมาณระยะทางที่ยึดด้วย

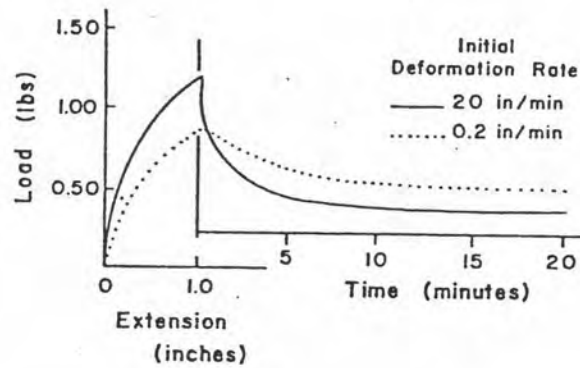


รูปที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงต่อความยาวที่ยืดออกของ K2 Alastik ซึ่งถูกยืดออกด้วยอัตราเร็วต่างกัน 3 อัตรา จนกระทั่งขาด (10)

พบว่าโมดูลที่ยืดด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่า ในช่วงแรกจะมีความแข็งแรงและให้แรงมากกว่า เมื่อยืดโมดูลต่อไปจนยาว 1.3 ถึง 1.5 นิ้ว พบว่าเส้นกราฟจะตัดกัน และจะกลับกัน โดยโมดูลที่ยืดด้วยอัตราเร็วที่ช้ากว่า จะมีความแข็งแรงและให้แรงที่มากกว่าจนขาด

2. ลักษณะการลดลงของแรงตามระยะเวลา ดังในรูปที่ 27 แสดงให้เห็นว่า เมื่อยืดโมดูลออกเป็นระยะทางคงที่ จะมีแรงลดลงเรื่อย ๆ โดยโมดูลที่ยืดด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่า และมีแรงเริ่มต้นที่สูงกว่า จะมีการลดลงของแรงอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นจากผลการทดลองเหล่านี้ Kovatch และคณะ จึงแนะนำให้ทันตแพทย์จัดฟัน ยืดโมดูลอย่างช้า ๆ เมื่อใช้งาน เพื่อคงระดับของแรงขนาดสูงไว้ให้ได้เป็นเวลานาน



รูปที่ 27 แสดงการลดลงของแรงตามระยะเวลาของ K2 Elastiks ซึ่งถูกยึดให้มีความยาว 1 นิ้ว ด้วยอัตราเร็ว 2 อัตรา (10)

Brooks และ Hershey (12)

ศึกษาถึงผลของความร้อน และการพริส เตรีซ

ต่อลักษณะการลดลงของแรงของพลาสติกโมดูล

ซึ่งการศึกษาที่ผ่านมาไม่มีผู้ใดสนใจ

ทดลองในแง่นี้มาก่อน

วัสดุและวิธีการ

ศึกษาโดยใช้พลาสติกโมดูลจากบริษัท 3 แห่ง จำนวนหลายร้อยชิ้น นำมายึดบน

เครื่องมือที่สามารถเคลื่อนได้ เลียนแบบการเคลื่อนหัน แบ่งกลุ่มทดลองเพื่อให้ทราบถึงผลของการ

ให้ความร้อน ซึ่งเป็นการเลียนแบบการต้มเครื่องต้มร้อน และการพริส เตรีซ โมดูลก่อนนำไปใช้

วัดแรงที่เกิดขึ้นด้วยคาร์โป เกจ ในคอนเริ่มค้น, 1, 24 ชั่วโมง และ 1, 2, 3,

4 สัปดาห์

ผลการทดลองพบว่า กลุ่มควบคุมจะแสดงผลคล้ายคลึงกับการศึกษาของผู้อื่นที่ผ่านมา

สำหรับโมดูลที่ถูกให้ความร้อน จะมีแรงหลงเหลืออยู่ร้อยละ 30 ของแรงเริ่มต้นใน 1 ชั่วโมง

และเหลือร้อยละ 20 เมื่อครบ 4 สัปดาห์ แต่ถ้าโมดูลถูกพริส เตรีซ ก่อน แล้วให้ความร้อน

แรงที่หลงเหลืออยู่จะสูงขึ้น คือเหลือร้อยละ 50 ใน 1 ชั่วโมง และร้อยละ 31 เมื่อครบ

4 สัปดาห์ สรุปได้ว่า เมื่อพลาสติกโมดูลถูกให้ความร้อน แรงที่ได้จากการยึดโมดูลจะลดน้อยลง

แต่การพริส เตรีซ จะช่วยปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นได้

Ash และ Nikolai (11) ศึกษาการลดลงของแรงของพลาสติกโมดูลทั้งแบบนอกกาย (In Vitro) และในกาย (In Vivo) โดยกล่าวว่า การศึกษาที่ผ่านมาเป็นแบบนอกกายทั้งนั้น ยังไม่มีใครศึกษาแบบในกาย ซึ่งมีองค์ประกอบต่าง ๆ แตกต่างจากนอกกาย ได้แก่ การ Activate เครื่องมือ, การบดเคี้ยวอาหาร, การรักษาสุขภาพช่องปาก, ส่วนประกอบทางเคมีของเอนไซม์ (Enzyme) ในน้ำลาย และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่องปากตามอาหารที่รับประทาน

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงต้องการเปรียบเทียบรูปแบบของการลดลงของแรงในสภาพแวดล้อม 3 แบบคือ ในอากาศแห้ง, ในน้ำ, และในกาย โดยทดลองกับพลาสติกโมดูลชนิด Injection-Molding ของบริษัท Unitek 2 แบบคือ

1. CK Grey Chain
2. K1 Standard Module

การทดลองนอกกาย วัสดุจะถูกยึดบนลวดเหลี่ยมขนาด 0.0215×0.0275 นิ้ว ซึ่งมีลวดทองเหลืองขนาด 0.025 นิ้ว เชื่อมติดอยู่ เป็นระยะทางห่างกัน 28 มิลลิเมตร เป็นเวลา 3 สัปดาห์ การทดลองนอกกายจะถูกควบคุมอุณหภูมิโดย Elconap Laboratory Oven ซึ่งจะคงอุณหภูมิไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง และทำการตรวจเช็คทุกวัน เครื่องมือวัดแรงที่ใช้คือ Chatillon Spring-Tension Gauge ใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องวัดแรงทั้งก่อนและหลังการทดลอง

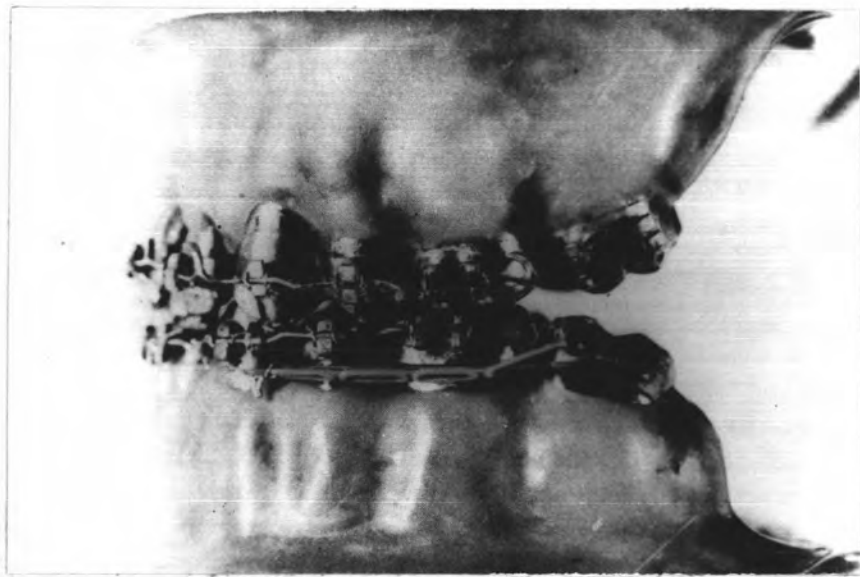
กลุ่มตัวอย่างจะประกอบด้วย โมดูลกลุ่มละ 15 ชิ้น ซึ่งยึดออกอย่างช้า ๆ แล้วใส่บนโครงลวด ตามคำแนะนำของ Kovatch และคณะ (10) ทำการวัดแรงเป็นช่วง ๆ ดังนี้ ตอนเริ่มต้น, 30 นาที, 1, 8 และ 24 ชั่วโมง และ 1, 2 และ 3 สัปดาห์

การทดลองในอากาศแห้ง กระทำดังนี้ วัดแรงในตอนเริ่มต้น แล้วนำเข้าตู้อบที่ได้รับอุณหภูมิไว้ 37 องศาเซลเซียส ล่วงหน้าแล้ว วัดแรงในช่วง 3 สัปดาห์ โดยนำวัสดุออกจากตู้อบ เฉพาะตอนวัดแรงเท่านั้น

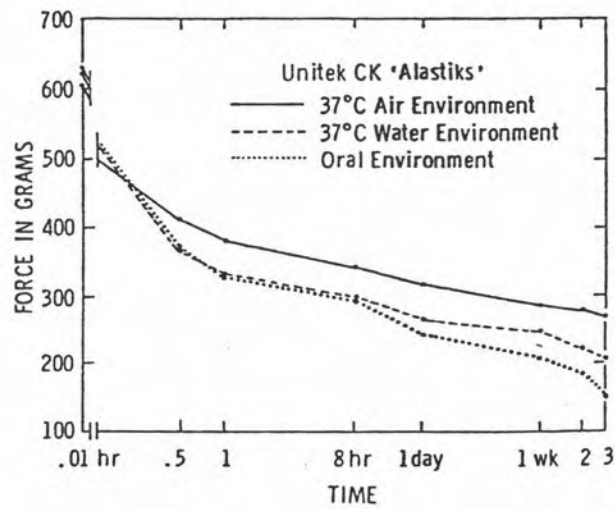
การทดลองในน้ำ วัสดุถูกวัดแรงในตอนเริ่มต้น แล้วนำไปแช่ในน้ำซึ่งมีอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แล้วนำเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิเช่นเดียวกัน จะนำวัสดุออกจากเครื่องอ่างน้ำ (Water Bath) เฉพาะตอนวัดแรงเท่านั้น

การทดลองในกาย กลุ่มตัวอย่างเป็นชาย 5 คน หญิง 6 คน อายุตั้งแต่ 11.5 ถึง 13.2 ปี การใส่ไมครูลกระทำดังรูปที่ 28 ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟันเขี้ยว, ฟันกรามน้อย และ ฟันกรามซี่ที่หนึ่งชิดกันอยู่แล้ว ดังนั้นการทดลองครั้งนี้ฟันจะไม่มี การเคลื่อนที่ เป็นเพียงการศึกษา ถึงการลดลงของแรง ซึ่งเกิดจากการเสื่อมทางเคมีของวัสดุเท่านั้น ซึ่งในการใช้งานทางคลินิก นั้น จะมีองค์ประกอบทั้งการเสื่อมทางเคมี รวมทั้งการเคลื่อนของฟัน ส่งผลให้แรงลดลง

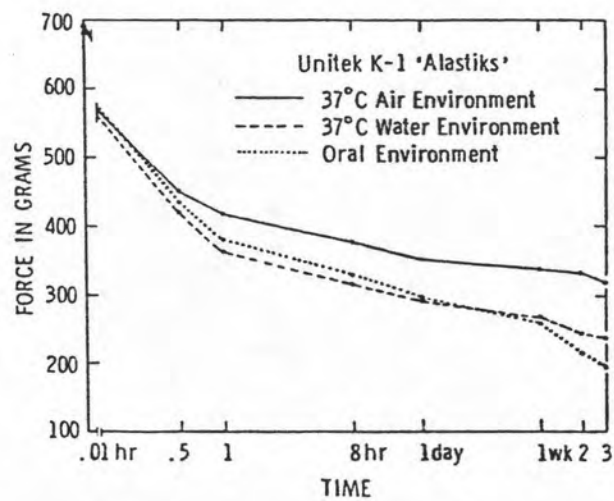
ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 29, 30 และตารางที่ 1



รูปที่ 28 แสดงการใส่ไมครูลจากฟัน เขี้ยวล่าง ไปยังฟันกรามล่างซี่ที่สอง (11)



รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาของ CK Alastiks ซึ่งถูกยึดให้มีระยะทางคงที่ 28 มิลลิเมตร ในสภาพแวดล้อม 3 แบบ (11)



รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาของ K-1 Alastiks ซึ่งถูกยึดให้มีระยะทางคงที่ 28 มิลลิเมตร ในสภาพแวดล้อม 3 แบบ (11)

For CK "Alastiks" Time	in Air Mean (SD)/%age	in Water Mean (SD)/%age	In Vivo Mean (SD)/%age
Zero	603(± 101)/	624(± 69)/	630(± 152)/
0.5 hr	408(± 83)/68	367(± 42)/59	371(± 89)/59
1 hr	380(± 80)/63	331(± 40)/53	328(± 81)/52
8 hr	342(± 71)/57	299(± 45)/48	294(± 70)/47
1 da	318(± 68)/53	264(± 37)/42	245(± 59)/39
1 wk	288(± 62)/48	247(± 30)/40	212(± 63)/34
2 wk	281(± 57)/47	223(± 31)/36	188(± 47)/30
3 wk	270(± 55)/45	209(± 29)/33	158(± 37)/25

For K-1 "Alastiks" Time	in Air Mean (SD)/%age	in Water Mean (SD)/%age	In Vivo Mean (SD)/%age
Zero	687(± 160)/	693(± 137)/	694(± 102)/
0.5 hr	449(± 108)/65	418(± 95)/60	435(± 76)/63
1 hr	417(± 105)/61	362(± 72)/52	379(± 77)/55
8 hr	376(± 96)/55	315(± 71)/45	328(± 77)/47
1 da	350(± 91)/51	290(± 68)/42	293(± 77)/42
1 wk	334(± 88)/49	265(± 59)/38	260(± 82)/37
2 wk	329(± 91)/48	241(± 59)/35	216(± 48)/31
3 wk	316(± 91)/46	236(± 58)/34	193(± 40)/28

ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยของแรงเป็นกรัม, ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, และร้อยละของแรงเริ่มต้น ของ CK และ K-1 Alastiks ในสภาพแวดล้อมต่างกัน 3 แบบ (11)

สรุป การทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาการลดลงของแรง เมื่อยึดพลาสติกโมดูลเป็นระยะทางคงที่ที่ 28 มิลลิเมตร ในอากาศแห้ง, น้ำ ส่วนในกายจะยึดจากพันเขียวไปยังพันครามซี่ที่หนึ่ง การศึกษาแบบนอกกายจะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส พบว่า รูปแบบของการลดลงของแรงในสภาพแวดล้อมทั้ง 3 แบบ จะคล้ายคลึงกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไป $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง การลดลงของแรงในกายจะมากกว่าในอากาศอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อครบ 3 สัปดาห์ ก็ลดลงมากกว่าในอากาศถึงร้อยละ 20

ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองในกายกับในน้ำ จะเริ่มพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์ โดยการลดลงของแรงในกายจะมากกว่าในน้ำ และเมื่อครบ 3 สัปดาห์ ความแตกต่างนี้จะมีค่าประมาณ 45 กรัม ซึ่งอาจไม่มีนัยสำคัญทางคลินิก เมื่อคำนึงถึงแรงเริ่มต้นซึ่งสูงถึง 600-700 กรัม

ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการลดลงของแรงของ CK Grey Chain และ K1 Standard Module

Ash และ Nikolai ยังได้กล่าวว่า ความรุนแรงของการลดลงของแรงจะขึ้นกับขนาดแรงเริ่มต้น การทดลองครั้งนี้เขาใช้แรงที่สูงเกินไปกว่าที่จำเป็นต้องใช้ในการดึงพันธ์เขี้ยว ถอยหลัง และแนะนำว่าควรมีการทดลองในคลินิก ซึ่งใช้แรงเริ่มต้น 24 ออนซ์ (680 กรัม), 18 ออนซ์ (510 กรัม) และ 12 ออนซ์ (340 กรัม) เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดจากแรง เริ่มต้น ที่ต่างกัน ในการดึงพันธ์เขี้ยว

Brantley, Salander, Myers และ Winders (6) สนใจผลการทดลองของ Brooks และ Hershey (12) ซึ่งพบว่า การพริสเตร็กซ์จะช่วยปรับปรุงคุณภาพของพลาสติกโมดูลได้ เขาทำการศึกษาการพริสเตร็กซ์ โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. ศึกษาสภาพแวดล้อมและเวลาที่ใช้ในการพริสเตร็กซ์
2. ศึกษาถึงผลของช่วงเวลาหลังจากการพริสเตร็กซ์ กับการเริ่มต้นทดสอบการลดลงของแรง

วัสดุและวิธีการ

1. Alastik C Spool Chain ของบริษัท Unitek
2. Power Chain II ของบริษัท Ormco

วัสดุทั้งสองจะถูกตัดออกเป็นชิ้น ๆ ละ 4 ท่วง ทำการทดลองกลุ่มละ 10 ชิ้น เครื่องมือที่ใช้เป็นตัวยึดโมดูลทำด้วยพลาสติก มีขนาด .040 นิ้ว จำนวน 40 คู่ บั๊กลงไปเป็นแถว 2 แถว ให้มีระยะห่างกัน 22.4 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะทางประมาณ 2 เท่า ของความยาวของโมดูลก่อนยึด ระยะทางนี้จะใช้เท่ากันทั้งในการพริสเตร็กซ์ และในตอนวัดการลดลงของแรง ใช้คาร์โบ เกจ วัดแรงในตอนเริ่มต้น และตอนสิ้นสุดการพริสเตร็กซ์ หลังจากนั้นจะวัดอีกในตอนเริ่มต้นทดสอบการลดลงของแรง, 1, 4 และ 24 ชั่วโมง และ 1, 2 และ 3 สัปดาห์

สภาพแวดล้อม 2 อย่าง ที่ใช้ในการพริสเตร็กซ์คือ

1. ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (กลุ่ม B และ C)
2. ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (24 องศาเซลเซียส, กลุ่ม D และ E)

นอกจากนั้นยังใช้เวลาในการพรีส เตรีชต่างกันดังนี้คือ

1. กลุ่ม C และ E จะถูกพรีส เตรีชเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และจะทำการวัดการลดลงของแรง เมื่อเวลาผ่านไปดังนี้

1.1 วัดทันทีหลังจากสิ้นสุดการพรีส เตรีช

1.2 วัดหลังจากสิ้นสุดการพรีส เตรีชแล้ว 24 ชั่วโมง

2. กลุ่ม B และ D จะถูกพรีส เตรีชเป็นเวลา 3 สัปดาห์ และจะทำการวัดการลดลงของแรง เมื่อเวลาผ่านไปดังนี้

2.1 วัดทันที

2.2 วัดเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

2.3 วัดเมื่อเวลาผ่านไป 1 สัปดาห์

สำหรับวัสดุที่ไม่ได้วัดแรงทันทีหลังจากพรีส เตรีชเสร็จแล้ว จะถูกเอาออกจากพลาสติกที่ไซยิด แล้วนำมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (24 องศาเซลเซียส) เมื่อเริ่มวัดการลดลงของแรง จึงนำมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตลอด 3 สัปดาห์

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2, 3

Test Group	PS Conditions	Time after End PS to Start Test	Force at Start PS	Force at End PS	Force Values during Degradation Testing						
					Initial	1 hr	4 hr	24 hr	1 wk	3 wk	
A	Controls - No PS				423(8)	208(7)	178(6)	147(5)	125(7)	116(7)	113(5)
B	37°C Water 3 wk	0 (Immediately)	441(9)*	130(12)	130(12)	125(5)	124(5)	123(7)	122(6)	122(6)	122(6)
		24 hr	447(14)	133(5)	167(7)	123(8)	128(11)	123(7)	117(7)	116(5)	121(3)
		1 wk	439(14)	132(6)	194(12)	133(7)	122(4)	117(5)	117(5)	119(3)	119(3)
C	37°C Water 24 hr	0	444(16)	164(5)	164(5)	163(10)	158(8)	151(7)	135(7)	131(9)	129(7)
		24 hr	445(8)	166(7)	237(10)	163(4)	155(5)	147(4)	133(8)	124(8)	123(6)
D	24°C Air 3 wk	0	445(13)	258(6)	258(6)	199(9)	181(7)	145(7)	136(5)	124(5)	121(6)
		24 hr	446(8)	258(6)	343(9)	199(7)	174(7)	157(7)	128(4)	122(6)	127(5)
		1 wk	439(7)	251(9)	344(7)	204(10)	177(8)	146(5)	124(5)	134(7)	131(6)
E	24°C Air 24 hr	0	445(9)	305(14)	305(14)	209(7)	183(12)	160(9)	132(6)	128(6)	127(5)
		24 hr	437(17)	319(14)	370(9)	215(12)	191(11)	164(7)	139(11)	129(9)	123(5)

*Mean value (standard deviation). All measurements are in grams.

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองของพลาสติกโมดูลของบริษัท Unitek (6)

Test Group	PS Conditions	Time after End PS to Start Test	Force at Start PS	Force at End PS	Force Values during Degradation Testing						
					Initial	1 hr	4 hr	24 hr	1 wk	2 wk	3 wk
A	Controls - No PS				374(5)	205(7)	181(3)	164(7)	144(5)	132(6)	131(6)
B	37°C Water 3 wk	0 (Immediately)	361(9) [*]	156(7)	156(7)	152(6)	152(4)	145(7)	149(3)	148(4)	149(3)
		24 hr	364(10)	162(8)	209(9)	154(7)	150(7)	151(7)	146(5)	142(4)	146(5)
		1 wk	358(10)	162(8)	222(6)	157(5)	149(3)	146(5)	148(4)	148(4)	146(5)
C	37°C Water 24 hr	0	393(11)	181(5)	181(5)	175(5)	171(4)	165(4)	152(5)	147(4)	148(3)
		24 hr	389(13)	190(7)	261(4)	186(6)	175(6)	170(5)	157(5)	149(2)	147(4)
D	24°C Air 3 wk	0	361(14)	244(5)	244(5)	197(9)	182(6)	164(5)	160(8)	142(4)	145(5)
		24 hr	373(7)	248(4)	317(9)	202(6)	182(8)	167(5)	159(6)	140(8)	150(0)
		1 wk	370(9)	242(12)	312(8)	201(6)	173(5)	155(7)	147(5)	150(0)	150(0)
E	24°C Air 24 hr	0	375(22)	315(13)	315(13)	200(6)	187(7)	173(10)	153(7)	145(4)	149(4)
		24 hr	386(9)	274(15)	333(7)	205(5)	189(4)	171(5)	162(9)	148(5)	145(5)

*Mean value (standard deviation). All measurements are in grams.

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองของพลาสติกโมดูลของบริษัท Ormco (6)

สรุปผลการทดลองดังนี้

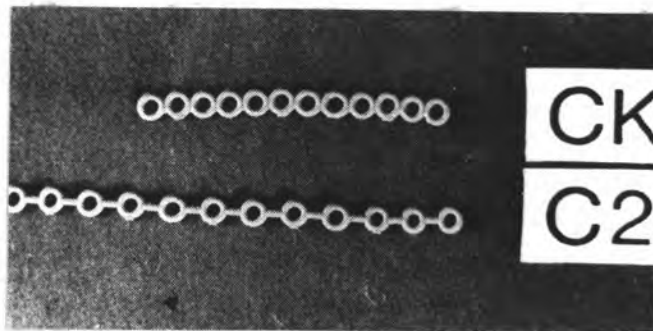
1. การพรีสเตรชในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลาระหว่าง 24 ชั่วโมง-1 สัปดาห์ เป็นเทคนิคที่ทำให้พลาสติกโมดูล ให้แรงที่เกือบคงที่ แต่ต้องใช้โมดูลนั้นทันที หลังจากพรีสเตรชเสร็จ
2. การพรีสเตรชในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (24 องศาเซลเซียส) เป็นเทคนิคที่ไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะทำให้พลาสติกโมดูล ให้แรงที่เกือบคงที่ได้
3. ถึงแม้ว่า Unitek Alastik C Spool Chain จะมีแรงเริ่มต้นสูงกว่า Ormco Power Chain II แต่ Ormco Power Chain II จะรักษาระดับแรงได้สูงกว่าหลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป จนสิ้นสุดการทดลอง
4. พบว่าโมดูลแต่ละชนิดไม่ว่าจะพรีสเตรชวิธีใดก็ตาม จะให้แรงในคอนสตันต์การทดลองใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุมด้วย

5. กลุ่มควบคุม (กลุ่ม A) มีการลดลงของแรงคล้ายคลึง กับผลการทดลองของ Andreasen และ Bishara (8, 18), Hershey และ Reynolds (9), Wong (5), Ash และ Nikolai (11)

Young และ Sandrik (7) ได้ศึกษาถึงผลของการพริสเตรชต่อการลดลงของแรงของพลาสติกโมดูล

วัสดุที่ใช้ (รูปที่ 31)

1. Unitek's CK Gray Chain Alastik
2. Unitek's C2 Gray Chain Alastik



รูปที่ 31 CK และ C2 Gray Chain (7)

เครื่องมือที่ใช้ยึดโมดูลพร้อมทั้งวัดแรงยึดได้พร้อม ๆ กันคือ Instron Machine ทำการวัดแรงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

โมดูลที่ใช้จะถูกตัดเป็นชิ้น ๆ ละ 4 ท่วง เพื่อเลียนแบบการเคลื่อนฟันเขี้ยวไปยังด้านหลัง ซึ่งจะคล้อยจากฟันเขี้ยวไปยังฟันกรามซี่ที่หนึ่ง แรงเริ่มต้นที่ใช้คือ 90 กรัม ในทุกกลุ่มที่ทดลอง ยกเว้นกลุ่ม G

เครื่องมือที่ใช้พริสเตรชโมดูลเป็นเครื่องมืออย่างง่ายที่สร้างขึ้นมา ดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 เครื่องมือที่ใช้พริสเตรชโมดูล (7)

ทำการพรีสเตรชโดยใช้มือดึงอย่างรวดเร็ว และปล่อยกลับทันทีสู่ตำแหน่งเดิม กำหนดระยะทางที่ใช้ในการพรีสเตรชดังนี้

1. CK Chain แบ่งเป็น 2 กลุ่ม
 - 1.1 กลุ่ม A 14 มิลลิเมตร
 - 1.2 กลุ่ม B 23 มิลลิเมตร
2. C2 Chain แบ่งเป็น 3 กลุ่ม
 - 2.1 กลุ่ม C 48 มิลลิเมตร
 - 2.2 กลุ่ม D 36 มิลลิเมตร
 - 2.3 กลุ่ม E 18 มิลลิเมตร

นอกจากนั้นยังแบ่ง C2 Chain ออกเป็นอีก 2 กลุ่มดังนี้

- 2.4 กลุ่ม F เป็นการทดลองถึงผลของความขึ้นต่อการลดลงของแรง โดยเก็บโมดูลไว้ในที่ที่มีความชื้น 100 % ตลอดการทดลอง
- 2.5 กลุ่ม G เป็นการทดลองถึงผลของแรงเริ่มต้นที่สูงเป็น 2 เท่า คือ 180 กรัม เพื่อต้องการศึกษาถึงผลของความเค้นที่แตกต่างกันต่อการลดลงของแรง

กลุ่มควบคุมมี 2 กลุ่มคือ CK และ C2 Chain ซึ่งไม่ถูกพรีสเตรช และถูกดึงให้มีแรงเริ่มต้น 90 กรัม เช่นเดียวกัน

กลุ่มทดลองทุกกลุ่มยกเว้นกลุ่ม F หลังจากพรีสเตรช จะแช่ในน้ำจืดไอออน (Deionized Water) ที่ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

สรุปผลการทดลองได้ว่า

1. CK Chain กลุ่มควบคุมจะมีแรงลดลงเหลือร้อยละ 63.4 หลังจาก 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นก็จะมีแรงลดลงของแรงเรื่อย ๆ จนเหลือร้อยละ 43.6 เมื่อครบ 24 ชั่วโมง ส่วน C2 Chain กลุ่มควบคุมจะมีแรงลดลงเหลือร้อยละ 68.6 หลังจาก 1 ชั่วโมงแรก และร้อยละ 56.4 เมื่อครบ 1 วัน จากการทดสอบทางสถิติ พบว่า C2 มีแรงหลงเหลือเมื่อครบ 1 วัน สูงกว่า CK อย่างมีนัยสำคัญ

2. CK Chain ซึ่งถูกพรีสเตรซ จะลดการลดลงของแรงอย่างมีนัยสำคัญถึงร้อยละ 17-25 เมื่อครบ 1 วัน ส่วน C2 Chain ซึ่งถูกพรีสเตรซ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับกลุ่มควบคุม

3. กลุ่มทดลองกลุ่ม F ซึ่งเก็บโมดูลตลอดการทดลองในความขึ้น 100 % พบว่าไม่มีผลต่อความแข็งแรง (Strength) และการลดลงของแรง

4. การเพิ่มแรงเริ่มต้นเป็น 2 เท่า ของกลุ่มควบคุม พบว่ามีการลดลงของแรงมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง Young และ Sandrik กล่าวว่า อาจจะเป็นเพราะวัสดุถูกยืดจนเกินขีดจำกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) จนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร

Genova, McInnes-Ledoux , Weinberg และ Shaye (3) ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้านการลดลงของแรงของพลาสติกโมดูลต่างบริษัทคือ

1. Power Chain II ของบริษัท Ormco Corporation
2. Energy Chain ของบริษัท Rocky Mountain Orthodontics
3. Elast -0 Chain ของบริษัท TP Laboratories

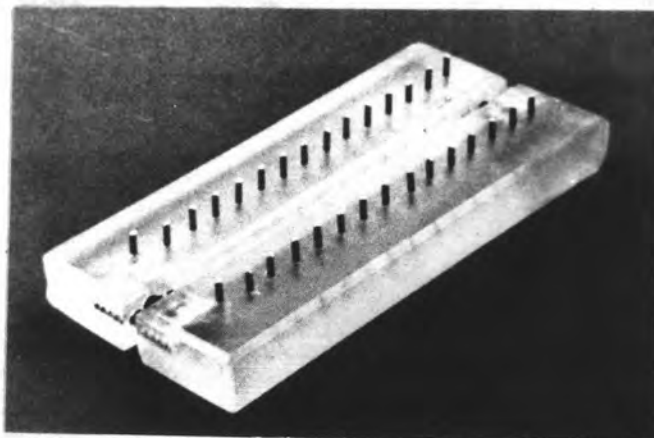
โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงของพลาสติกโมดูลทั้ง 3 ชนิด ซึ่งยึดเป็นระยะทางคงที่ ตลอดเวลา 3 สัปดาห์
2. สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรง เมื่อทำการทดลองในอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง 15 และ 45 องศาเซลเซียส เพื่อเลียนแบบการรับประทานอาหาร
3. สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงเมื่อใช้แรงเริ่มต้นต่างกัน เมื่อยึดเป็นระยะทางคงที่
4. สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงเมื่อลกระยะทางที่ใช้ยึดโมดูล 0.5 มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ เพื่อเลียนแบบการเคลื่อนฟัน

ใช้เครื่องมือสำหรับยึดโมดูล 2 แบบคือ

1. เครื่องมือสำหรับยึดโมดูล ซึ่งมีระยะทางในการยึดคงที่

2. เครื่องมือสำหรับยึดไมคูล ซึ่งมีสกรูทางทันตกรรมจัดฟัน แบ่งครึ่งตามความยาว ทำให้ลดระยะทางในการยึดไมคูล เลียนแบบการเคลื่อนฟันได้ ดังรูปที่ 33



รูปที่ 33 แสดงเครื่องมือที่ใช้ยึดไมคูล ประกอบด้วยแท่ง Polyester ที่มีหมุดเหล็กปักอยู่ 15 คู่ คนละข้างของสกรู ซึ่งใช้หมุนเข้าหากัน เพื่อเลียนแบบการเคลื่อนฟัน ไมคูล จะถูกยึด โดยสวมลงบนหมุดเหล่านี้ได้พร้อมกันทีละ 15 เส้น (3)

ระยะทางที่ใช้ในการทดลองคือ 20 มิลลิเมตร

เครื่องวัดแรงที่ใช้คือเครื่องวัดแรงแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Force Gauge)

ไมคูลทั้งหมดจะถูกแช่ในน้ำลายสังเคราะห์ตลอดการทดลอง 3 สัปดาห์

วิธีทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. การทดสอบถึงผลของแรงเริ่มต้น และอุณหภูมิต่อการลดลงของแรง

ไมคูลแต่ละบริษัทจะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีจำนวนห่วงน้อย ซึ่งจะให้แรงมาก และกลุ่มที่มีจำนวนห่วงมาก ซึ่งจะให้แรงน้อย นำมาทดสอบในสภาพแวดล้อม 2 ชนิดคือ อุณหภูมิคงที่ (37 องศาเซลเซียส) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่าง 15 และ 45 องศาเซลเซียส เพื่อเลียนแบบสภาพในช่องปาก ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากอาหารที่รับประทาน ระยะทางที่ใช้คือ 20 มิลลิเมตร คงที่ตลอดการทดลอง วัดแรง 14 ครั้ง คือ ตอนเริ่มต้น, 5 และ 30 นาที, 1, 8 และ 24 ชั่วโมง และ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 และ 21 วัน

2. การทดสอบถึงผลของการลดระยะทางที่ใช้ในการยึดโมดูลด้วยอัตรา 0.5 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

แบ่งโมดูลเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีจำนวนห่วงน้อย และกลุ่มที่มีจำนวนห่วงมาก เช่น เดิม

การลดระยะทางจะกระทำเมื่อวัดแรงในช่วงนั้น ๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วคือ

2.1 ครั้งที่ 1 ลดระยะทางจาก 20 มิลลิเมตร เป็น 19.5 มิลลิเมตร เมื่อครบ 1 วัน

2.2 ครั้งที่ 2 ลดระยะทางจาก 19.5 มิลลิเมตร เป็น 19 มิลลิเมตร เมื่อครบ 7 วัน

2.3 ครั้งที่ 3 ลดระยะทางจาก 19.0 มิลลิเมตร เป็น 18.5 มิลลิเมตร เมื่อครบ 14 วัน

ผลการทดลอง

1. การทดสอบถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงผลดังตารางที่ 4

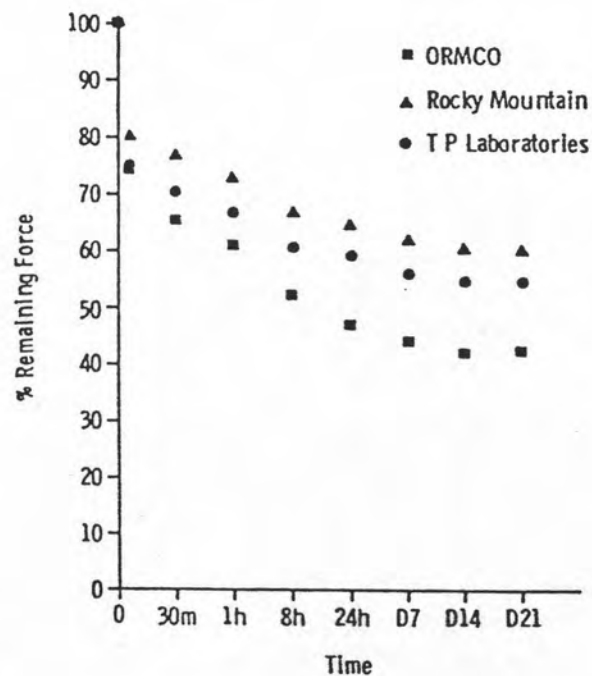
Material	Treatment	Time													
		30 min		1 hr		8 hr		24 hr		7 day		14 day		21 day	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Product A	37° C	62.7	4.1	58.9	4.4	52.5	3.8	46.7	3.7	42.0	3.3	41.7	3.1	39.1	3.9
	Thermal-cycled	65.6	1.2	61.2	2.0	52.3	1.7	47.9	1.9	44.2	1.6	42.3	1.3	42.5	1.8
Product B	37° C	74.2	3.0	71.2	4.1	67.6	3.6	62.8	2.8	57.9	2.8	58.3	3.0	56.0	2.8
	Thermal-cycled	77.0	3.7	73.2	3.4	66.8	3.8	64.7	3.7	62.0	2.6	60.9	2.7	60.8	2.8
Product C	37° C	66.8	4.3	61.6	5.6	60.5	5.0	56.7	4.5	51.6	4.6	51.5	3.8	49.8	5.8
	Thermal-cycled	70.7	4.4	67.1	5.4	60.6	5.6	59.9	5.2	56.3	6.2	55.0	5.4	54.9	5.0

ตารางที่ 4 แสดงอัตราร้อยละเฉลี่ยของแรงที่เหลืออยู่ของโมดูลยาวและสั้นซึ่งคิดรวมกัน ซึ่งถูกดึงเป็นระยะทางคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (3)

พบว่าโมดูลที่ทดลองในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะมีแรงหลงเหลือ คิดเป็นอัตราร้อยละ (Percentage) ของแรงเริ่มต้นสูงกว่า เมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส คงที่

2. การเปรียบเทียบโมดูลทั้ง 3 บริษัท

กราฟแสดงการลดลงของแรงเมื่อยึด เป็นระยะทางคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 กราฟแสดงอัตราร้อยละเฉลี่ยของแรงที่เหลืออยู่ของโมดูลยาวและสั้น ของทั้ง 3 บริษัท ซึ่งคิดรวมกัน ที่ถูกดึงเป็นระยะทางคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (3)

พบว่า Energy Chain มีอัตราร้อยละของแรงที่เหลืออยู่สูงที่สุด รองลงมาคือ Elast-0 Chain และ Power Chain II ตามลำดับ

3. การทดสอบถึงผลของแรง เริ่มต้นต่อการลดลงของแรง

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5 และ 6

Material	Module length	Force (grams)			
		Initial		Final (21 days)	
		Mean	SD	Mean	SD
Product A	Long	240.8	9.8	99.4	6.8
	Short	360.0	22.0	158.0	9.2
Product B	Long	289.6	26.5	182.6	5.4
	Short	436.0	14.3	272.8	11.9
Product C	Long	389.8	49.1	204.4	3.6
	Short	413.2	33.5	236.2	18.9

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยของแรง เริ่มต้นและแรงสุดท้าย ของโมดูลยาวและโมดูลสั้น ที่ถูกดึงไว้เป็นระยะทางคงที่ และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีหน่วยเป็นกรัม (3)

Material	Module length	Time													
		30 min		1 hr		8 hr		24 hr		7 day		14 day		21 day	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Product A	Long	66.1	1.5	60.3	1.8	52.4	1.8	46.6	1.7	43.3	1.2	42.1	1.1	41.2	1.4
	Short	65.2	0.7	62.1	1.8	52.1	1.8	49.1	1.0	45.2	1.4	42.6	1.6	43.8	1.0
Product B	Long	74.9	3.6	71.4	3.8	64.4	3.6	61.8	2.6	60.4	2.1	59.1	2.0	59.0	2.1
	Short	79.1	2.5	75.0	1.9	69.2	2.3	67.7	1.4	63.7	2.1	62.6	2.1	62.6	2.1
Product C	Long	70.7	6.1	66.5	7.3	57.9	6.3	57.2	5.3	54.0	5.6	52.0	5.7	52.7	5.4
	Short	70.7	2.4	67.7	3.4	63.3	3.6	62.6	4.0	58.5	4.1	58.0	3.3	57.3	4.0

ตารางที่ 6 แสดงอัตราการย่อยละ เฉลี่ยของแรงที่เหลืออยู่ของโมดูลยาวและโมดูลสั้น ที่ถูกดึงไว้ เป็นระยะทางคงที่ และเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (3)

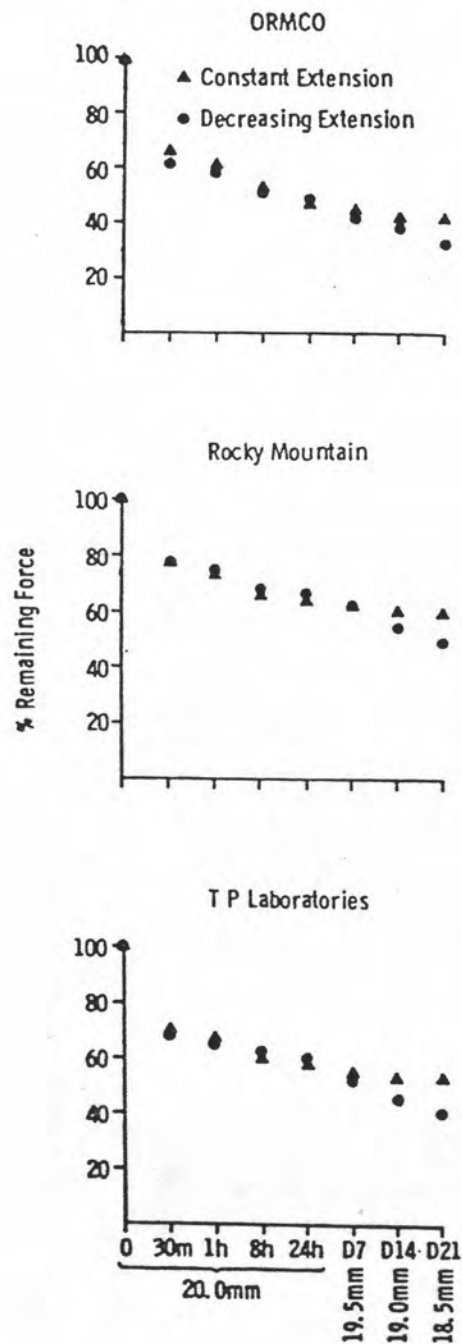
จากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า โมดูลที่สั้นกว่าจะให้แรงที่สูงกว่า โมดูลที่ยาว เมื่อยึด เป็นระยะทางคงที่เท่ากัน

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า โมดูลที่สั้นกว่ายังให้อัตราการย่อยละของแรงที่เหลือ อยู่ สูงกว่าโมดูลที่ยาว

ซึ่งสรุปได้ว่าโมดูลที่ให้แรง เริ่มต้นสูงกว่า จะมีอัตราการย่อยละของแรงที่เหลืออยู่สูงกว่า เช่นกัน

3. การทดสอบถึงผลของการ เลียนแบบการ เคลื่อนพันต่อการลดลงของแรง

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 35 และตารางที่ 7



รูปที่ 35 เป็นกราฟแสดงอัตราการย่อยละเอียดของแรงที่เหลืออยู่ของไมคูลทั้ง 3 บริษัท เปรียบเทียบระหว่างการยึดไมคูลเป็นระยะทางคงที่ และการลดระยะทางที่ยึดไมคูลลง พบว่าการลดระยะทาง จะทำให้ไมคูลทั้ง 3 บริษัท มีอัตราการย่อยละเอียดของแรงที่เหลืออยู่ลดลงจากการยึดไมคูลเป็นระยะทางคงที่ อย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่วันที่ 14 ถึง 21 (3)

Material	Module length	Force (grams)							
		Initial (20 mm)		7 day (19.5 mm)		14 day (19 mm)		21 day (18.5 mm)	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Product A	Long	216.4	11.3	89.4	4.2	81.2	3.9	69.4	3.3
	Short	325.8	13.2	143.4	6.2	125.0	8.6	111.4	5.5
Product B	Long	288.2	15.5	182.4	4.8	159.0	3.7	140.8	7.5
	Short	459.8	13.2	280.2	5.6	246.2	7.5	226.8	6.7
Product C	Long	425.8	55.4	222.2	33.8	185.8	30.7	168.2	27.0
	Short	459.6	27.4	258.0	21.6	226.0	22.2	203.4	22.0

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยของแรงของโมดูลทั้งยาวและสั้น เมื่อลดระยะทางที่ยึดโมดูล เพื่อ
เลียนแบบการเคลื่อนฟัน และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (3)

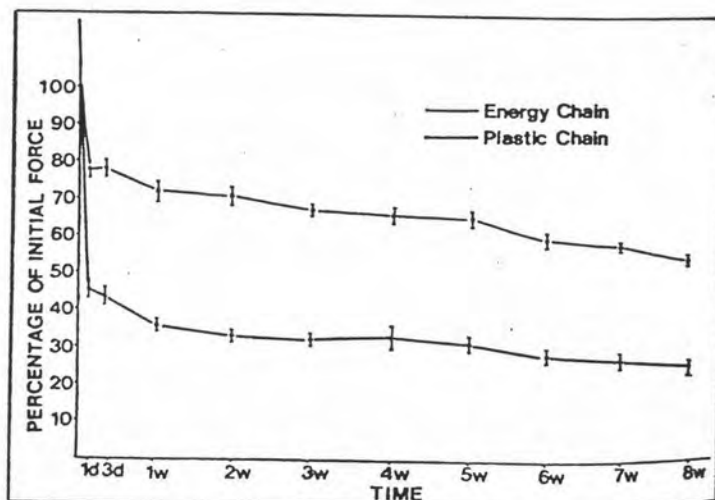
พบว่า การเลียนแบบการเคลื่อนฟันคือ การลดระยะทางที่ใช้ยึดโมดูลด้วยอัตรา
0.5 มิลลิเมตร ต่อสัปดาห์ จะลดอัตราร้อยละของแรงที่เหลืออยู่อย่างมีนัยสำคัญเมื่อครบ 14 วัน
(ลดระยะทางลง 1.0 มิลลิเมตร) และเมื่อครบ 21 วัน (ลดระยะทางลง 1.5 มิลลิเมตร)

Killiany และ Duplessis (13) ศึกษาเปรียบเทียบการลดลงของแรงระหว่าง
Energy Chain ชนิดห่วงชนิด ของบริษัท Rocky Mountain Orthodontics ซึ่งเขาสังเกต
พบในทางคลินิกว่ามีคุณสมบัติค่อนข้างดี กับ Plastic Chain ของบริษัท American
Orthodontics

วิธีทดลอง

ตัดโมดูลทั้ง 2 ชนิด เป็นชิ้น แต่ละชิ้นมีความยาว 19 มิลลิเมตร แล้วยึดออกเป็น
ระยะทาง 38 มิลลิเมตร ใช้เครื่อง Instron Machine วัดแรงเมื่อครบ 24, 72 ชั่วโมง
และสัปดาห์ละครั้งจนครบ 8 สัปดาห์ เก็บรักษาโมดูลตลอดการทดลองในน้ำลายสังเคราะห์
ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส เปลี่ยนน้ำลายสังเคราะห์ทุก ๆ 3 วัน

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 36 และตารางที่ 8



รูปที่ 36 แสดงการลดลงของแรงของ Energy Chain และ Plastic Chain ในช่วงเวลา 8 สัปดาห์ (13)

Time	Energy Chain			Plastic Chain		
	Mean	S.D.	%	Mean	S.D.	%
start	329.8	6.1	100.0	374.9	9.1	100.0
1 day	255.0	7.2	77.3	169.2	11.1	45.1
3 days	259.6	6.5	78.7	163.8	9.7	43.7
1 week	237.8	5.9	72.1	135.1	8.5	36.0
2 weeks	234.2	6.9	71.0	125.4	7.3	33.4
3 weeks	222.1	6.4	67.4	122.9	7.7	32.8
4 weeks	216.9	5.9	65.8	125.3	11.3	33.4
5 weeks	212.8	7.1	64.5	119.5	8.5	31.9
6 weeks	199.0	6.4	60.4	108.0	7.8	28.8
7 weeks	193.0	4.2	58.5	106.9	10.6	28.5
8 weeks	182.8	4.6	55.4	101.9	7.1	27.2

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉลี่ย มีหน่วยเป็นกรัม และอัตราร้อยละของแรงเริ่มต้น ในแต่ละช่วงเวลา ระหว่าง Energy Chain และ Plastic Chain (13)

พบว่าแรงที่เหลืออยู่ของโมดูลทั้งสอง เมื่อคิดเป็นอัตราร้อยละของแรงเริ่มต้น มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตลอดการทดลอง โดย Energy Chain จะมีแรงเริ่มต้นต่ำกว่า แต่แรงที่เหลืออยู่เมื่อครบ 8 สัปดาห์ จะยังสูงกว่าแรงที่เหลืออยู่ของ Plastic Chain เมื่อครบ 1 วัน

นอกจาก Ash และ Nikolai (11) ซึ่งศึกษาแบบในกายแล้ว Rock, Wilson และ Fisher (38) เป็นอีกคณะหนึ่งซึ่งศึกษาแรงที่ลดลงของโมดูลเมื่อใช้ในช่องปากเป็นเวลา 1 เดือน ในการปิดช่องว่างที่เกิดจากการถอนฟันกรามน้อยซี่ที่หนึ่ง

วัสดุที่ใช้

1. Plastic Chain ชนิด Clear-Short ของบริษัท American Orthodontics
2. Plastic Chain ชนิด Clear-Long ของบริษัท American Orthodontics
3. Power Chain II ชนิดสีเทา ของบริษัท Ormco Corporation
4. Power Chain I ชนิดสีเทา ของบริษัท Ormco Corporation
5. Power Chain II ชนิด Clear ของบริษัท Ormco Corporation
6. Power Chain I ชนิด Clear ของบริษัท Ormco Corporation
7. FM Ringlet ของบริษัท Morita Corporation

ใช้เครื่อง Instron Machine วัดแรง

พบว่า

1. เมื่อครบ 4 สัปดาห์แล้ว โมดูลที่มีความยาว 3 ห่วง จะให้แรงลดลงถึงร้อยละ 40 ซึ่งคล้ายคลึงกับโมดูลที่มีความยาว 4 ห่วง
2. เมื่อครบ 4 สัปดาห์ โมดูลที่มีความยาว 3 ห่วง ทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้ระหว่าง 0-3.8 มิลลิเมตร ในขณะที่โมดูลที่มีความยาว 4 ห่วง ทำให้ฟันเคลื่อนที่ได้ระหว่าง 0-5.1 มิลลิเมตร