

การปรับปรุงกระบวนการวัดสี่ชีพันเทียมเพื่อลดความผิดพลาดของการวัดสี่ด้วยการวิเคราะห์ระบบการวัด

จรรยา ชื่นอารมณ์^{1,*} และ เกตรา ชื่นอารมณ์²

¹สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่
จังหวัดสงขลา 90110

²วิทยาลัยศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์โคลัมเบีย มหาวิทยาลัยจอร์จทาวน์ วอชิงตันดีซี 20052 สหรัฐอเมริกา

*อีเมลของผู้ประพันธ์บรรณกิจ: chanya.ch@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่องสี่ชีพันหรือวัสดุบูรณะฟันเป็นหัวข้อวิจัยทางทันตกรรมที่สำคัญเรื่องหนึ่ง และจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่ให้ผลการวัดถูกต้องแม่นยำ การศึกษาครั้งนี้ต้องการนำการวิเคราะห์ระบบการวัดมาปรับปรุงกระบวนการวัดสี่ชีพันเทียม เพื่อลดความผิดพลาดของการวัดสี่สำหรับพนักงานวัดใหม่ โดยใช้พนักงานชำนาญการที่มีประสบการณ์สูงในการใช้เครื่องมือวัด 2 คน และพนักงานใหม่ที่ไม่เคยใช้เครื่องมือวัดมาก่อน 2 คน ให้พนักงานทั้ง 4 คน วัดค่าสี่ชีพันเทียมในชุดแถบเทียบสี่ฟันด้วยเครื่องมือวัดสี่แบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำค่าแตกต่างสี่ร่วม (ΔE) มาวิเคราะห์ความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของระบบการวัด ถ้าพบว่าสัดส่วนความแปรปรวนของระบบการวัดต่อความแปรปรวนรวม (%GR&R) มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ 30% ให้ปรับปรุงกระบวนการวัด ผลการวัดค่าแตกต่างสี่ร่วมของชุดเทียบสี่ฟันในรอบแรก พบว่า %GR&R มีค่า 59% สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ แต่เมื่อปรับปรุงกระบวนการวัดโดยกำหนดตำแหน่งวางชิ้นงานที่แน่นอนบนช่องวัด ร่วมกับการอบรมความรู้อย่างเข้มข้นให้กับพนักงานที่ไม่มีประสบการณ์ใช้เครื่องมือวัดมาก่อน พบว่า %GR&R ลดลงเหลือ 23% ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานวัดหรือวิธีการวัด และความสามารถในการวัดซ้ำระหว่างพนักงานวัดหรือระหว่างวิธีการวัด สามารถปรับปรุงได้ด้วยการวิเคราะห์ระบบการวัด และนำวิธีการที่ปรับปรุงมากำหนดเป็นขั้นตอนปฏิบัติสำหรับพนักงานวัดใหม่ได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ระบบการวัด; การวัดสี่; สี่ชีพันเทียม

Improving the Color Measurement Process for Denture Teeth to Reduce Color Measurement Errors by Measurement System Analysis

Chanya Chuenarrom^{1,*} and Petra Chuenarrom²

¹*Prosthetic Dentistry, Faculty of Dentistry, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand*

²*Columbian College of Arts & Sciences, George Washington University, Washington DC 20052, USA*

*Corresponding author's e-mail: chanya.ch@psu.ac.th

Abstract

The research on the color of teeth or dental restoration materials is an important issue that requires precision and accurate measuring. This study aims to apply measurement system analysis (MSA) to improve the color measurement process of denture teeth. The goal is to reduce measurement errors for inexperienced operators. Two experienced and two inexperienced operators performed color measurements of each denture teeth of the tooth shade guide using the spectrophotometer. The color difference values (ΔE) were analyzed to assess the repeatability and reproducibility of the measurement system. If the ratio of variance of the measurement system to the total variance (%GR&R) exceeds the acceptable threshold of 30%, it becomes imperative to improve the measurement process. The results of the color difference measurements before improvement revealed a %GR&R of 59%, exceeding the acceptable limit. After the measurement process was improved by setting the position of the denture teeth on a measuring port of the spectrophotometer and providing intensive knowledge to inexperienced operators about the color measurement principles and techniques, along with forewarning, the results showed a reduced %GR&R to 23%. This suggests that MSA can improve the repeatability of measurements by operators or methods, as well as the reproducibility between operators or methods. The improved measurement process can be established as a procedure for inexperienced operators.

Keywords: Measurement system analysis; Color measurement; Denture teeth

บทนำ

การรักษาผู้ป่วยทางทันตกรรมที่จำเป็นต้องมีการบูรณะฟันนั้น การเลือกเฉดสีของวัสดุทันตกรรมให้เหมือนหรือใกล้เคียงสีฟันที่สูญเสียไปมีความสำคัญมากขึ้นตอนหนึ่ง การศึกษาเรื่องสีของวัสดุทันตกรรมจึงเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่มีการค้นคว้าวิจัยอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ทันสมัยในการวัดสีของวัสดุ เช่น เครื่องวัดสีแบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดความแตกต่างระหว่างสีของวัสดุ 2 ชนิด ได้อย่างรวดเร็ว ทั้งการวัดแบบรวมความมันเงา (Reflectance specular include, RSIN) ที่เป็นการวัดสีจริงหรือเม็ดสีในเนื้อวัสดุ (Color pigment) และแบบตัดความมันเงา (Reflectance specular exclude, RSEX) ที่เหมือนการมองเห็นสีด้วยสายตามนุษย์ (Appearance)

แม้เครื่องวัดสีแบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์จะเป็นเครื่องมือที่ใช้งานได้ง่าย แต่ต้องเลือกปัจจัยการทดสอบให้เหมาะสมกับชิ้นงานและสภาวะขณะใช้งาน เช่น แหล่งกำเนิดแสง การวัดสีวัตถุแบบรวมหรือตัดความมันเงา ทิศทางของมุมมอง เป็นต้น และยังมีปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งของการวัดสีชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก เช่น ซี่ฟันหรือซี่ฟันเทียม คือ เมื่อวางชิ้นงานลงบนช่องวัดขนาดปกติของเครื่องวัดสีแล้ว ผิวชิ้นงานปิดคลุมช่องวัดได้ไม่หมดหรือไม่แนบสนิท แหล่งแสงจากภายนอกจะลอดเข้าไปในช่องวัด ทำให้เครื่องวัดอ่านค่าสีชิ้นงานไม่ถูกต้อง (Bolt et al., 1994) ช่องวัดขนาดเล็กของเครื่องวัดสีอาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 6-10 มิลลิเมตร และบางบริษัทอาจประยุกต์ใช้หน้ากากปิดช่องวัดให้มีขนาดเล็กลงจาก 9.5 มิลลิเมตร เหลือ 4 มิลลิเมตร (Hunter Associates Laboratory, 2016) โดยมีข้อกำหนดการใช้งานบางประการจากบริษัทผู้ผลิต การใช้ช่องวัดขนาดเล็กที่มีการประยุกต์นี้อาจทำให้เกิดความผันแปรของค่าที่วัดได้ง่าย นอกจากนั้นในห้องปฏิบัติการวิจัยของสถานศึกษา พนักงานวัดอาจเป็นผู้เชี่ยวชาญหรือนักวิจัยที่มีความชำนาญในการใช้เครื่องมือ หรือเป็นนักศึกษาที่ไม่เคยมีประสบการณ์ใช้เครื่องมือมาก่อนเลยก็ได้

จากการสังเกตการทำงานของนักศึกษาหรือผู้ช่วยนักวิจัย ที่ไม่มีประสบการณ์ใช้เครื่องวัดสีมาก่อน แม้จะได้รับคำแนะนำวิธีการวัดจากนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการแล้ว เมื่อวัดซ้ำชิ้นงานเดียวกัน ยังพบปัญหาความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของผลการวัด ทำให้ค่าที่วัดได้ขาดความน่าเชื่อถือ และไม่สามารถนำไปสู่ข้อยุติเพื่อสรุปผลการทดลองที่ถูกต้องได้ ความผันแปรของค่าที่วัดได้นี้ อาจเกิดจากความผันแปรของชิ้นงานร่วมกับความผันแปรของระบบการวัด ซึ่งสามารถใช้การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement system analysis, MSA) มาวิเคราะห์ให้ทราบแหล่งของความคลาดเคลื่อน และปรับปรุงกระบวนการวัดเพื่อป้องกันความผิดพลาดได้ (เอราวิล, 2560; ธีระพงษ์ และ เอกพล, 2563; เฉลิมศักดิ์ และ ก้าวหน้า, 2565; Ferreira, et al., 2020)

กลุ่มปฏิบัติการอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive Industry Action Group, AIAG) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ให้ความหมายของระบบการวัดไว้ว่าหมายถึง ระบบที่รวมไว้ซึ่งอุปกรณ์ วัดถุดิบ อุปกรณ์การวัด (Gage) มาตรฐาน ขั้นตอนการปฏิบัติการ วิธีการ อุปกรณ์จับยึดงาน ซอฟต์แวร์ บุคลากร สิ่งแวดล้อมและข้อสมมุติต่างๆ ที่ใช้ในการกำหนดปริมาณของหน่วยวัดหรือประเมินคุณลักษณะที่ได้รับการวัด ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถนำไปสู่ความผันแปรที่เกิดในระบบการวัดได้ ทั้งในด้านความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ความแม่นยำบ่งชี้ความสามารถของระบบในการอ่านค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริง เกิดจากความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานวัดหรืออุปกรณ์วัด (Repeatability) และความสามารถในการวัดซ้ำระหว่างพนักงานวัดหรือระหว่างอุปกรณ์วัด ที่เรียกว่าเป็นความสามารถในการวัดเหมือน (Reproducibility) ขณะที่ความเที่ยงตรง บ่งชี้ความสามารถของระบบที่วัดได้ค่าเดิมเสมอเมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง

ภายใต้ระบบการวัดโดยทั่วไปนั้น ค่าวัดที่ได้จะมีความผันแปรเสมอ การวิเคราะห์ระบบการวัดจึงมีจุดประสงค์สำคัญคือ วิเคราะห์ถึงแหล่งของความคลาดเคลื่อนในระบบการวัดที่มีทั้งปริมาณที่กำจัดได้และกำจัดไม่ได้ นำมาใช้เป็นข้อมูลในการกำจัดความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดที่สามารถกำจัดได้ เพื่อให้ระบบการวัดเป็นมาตรฐานยอมรับได้ (กิตติศักดิ์, 2553) ทั้งนี้วิธีประเมินความสามารถในการวัดซ้ำและการวัดเหมือนของกระบวนการวัด (Gage repeatability and reproducibility) หรือ Gage R&R เป็นวิธีการศึกษาที่พบบ่อยที่สุดในการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อประเมินความแปรผันทางสถิติในกระบวนการวัด (Peruchi et al., 2013; Ferreira, et al., 2020)

การวัดสีด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ มีปัจจัยหลักที่มีผลต่อความผันแปร คือ ชิ้นงาน พนักงานวัด เครื่องมือวัด สภาพแวดล้อมในการวัด และวิธีการวัด ซึ่งในห้องปฏิบัติการที่ผู้วิจัยรับผิดชอบอยู่นั้น มีเครื่องวัดสีแบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ 1 เครื่อง ติดตั้งประจำในบริเวณที่กำหนด ห้ามเคลื่อนย้าย ดังนั้นเครื่องมือวัดและ

สภาพแวดล้อมจึงเป็นปัจจัยที่ควบคุมให้เหมือนกันได้ ขณะที่ชิ้นงาน พนักงานวัด และวิธีการวัด อาจแตกต่างกันไปตามลักษณะโครงการวิจัยของนักวิจัยหรือนักศึกษา ในกรณีของการวัดสีพื้นธรรมชาติหรือสีพื้นเทียมนั้น ความผันแปรของชิ้นงานเป็นปัจจัยที่เกิดจากกระบวนการผลิตหรือธรรมชาติของชิ้นงานเอง ไม่สามารถควบคุมได้แล้วในขั้นตอนการวัดสี จึงเหลือเพียง 2 ปัจจัย ที่อาจมีผลต่อความผันแปรของระบบการวัด คือ พนักงานวัดและวิธีการวัด

งานวิจัยนี้ จึงสนใจการนำวิธีการวิเคราะห์ระบบการวัด มาใช้เป็นเครื่องมือกำจัดหรือลดความผันแปรที่เกิดจากผู้วัดและวิธีการวัด โดยเริ่มจากการวัดสีตามปกติดังที่เคยปฏิบัติมา ก่อนนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาพนักงานวัดและวิธีการวัดมีผลต่อความผันแปรของค่าที่วัดได้หรือไม่ โดยใช้ Gage R&R ประเมินความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานวัดหรือวิธีการวัด และความสามารถในการวัดซ้ำระหว่างพนักงานวัดหรือระหว่างวิธีการวัด ถ้า Gage R&R มีค่าเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จะต้องวิเคราะห์หาสาเหตุและปรับปรุงวิธีการวัด จนกระทั่ง Gage R&R มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะนำไปจัดทำขั้นตอนปฏิบัติการใช้เครื่องวัดสีสีพื้นเทียมหรือชิ้นงานอื่นๆที่มีขนาดเล็ก เพื่อให้นักศึกษาและนักวิจัยที่เพิ่งมาใช้เครื่องวัดสีเป็นครั้งแรก ได้ทราบถึงแหล่งของความผันแปรที่เกิดขึ้นได้ และต้องปฏิบัติตามขั้นตอนที่ถูกต้องอย่างไร เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากตัวพนักงานวัดเองและวิธีการวัดที่ใช้

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. นำการวิเคราะห์ระบบการวัด มาใช้ประเมินระบบการวัดสีสีพื้นเทียมตามวิธีปัจจุบันของห้องปฏิบัติการ
2. วิเคราะห์สาเหตุของความผันแปรของระบบการวัด และปรับปรุงระบบการวัดสีสีพื้นเทียมเพื่อลดความผิดพลาดของการวัด
3. จัดทำขั้นตอนปฏิบัติการวัดสีสำหรับพนักงานวัดใหม่ เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต

ระเบียบวิธีวิจัย

การวิเคราะห์ระบบการวัด

ความสามารถของระบบการวัด ประกอบด้วยความสามารถในการวัดซ้ำ คือ ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานและความวัดเหมือนของการวัด คือ ความสามารถในการวัดซ้ำระหว่างพนักงานวัดหรือระหว่างเครื่องมือวัด ซึ่งค่าที่วัดได้จากระบบการวัดจะมีความผันแปรตามองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ความผันแปรจากกระบวนการผลิตหรือจากชิ้นงาน และความผันแปรจากความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด เมื่ออาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะได้ว่า

$$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_p + \sigma^2$$

เมื่อ	σ^2_{total}	คือ ความแปรปรวนรวมทั้งหมด
	σ^2_p	คือ ความแปรปรวนของชิ้นงาน
	σ^2	คือ ความแปรปรวนของระบบการวัด (พนักงานวัดและวิธีวัด)

วิธีประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบ Gage R&R คำนวณได้จากร้อยละของสัดส่วนความแปรปรวนของระบบการวัด (σ^2) ต่อความแปรปรวนรวมทั้งหมด (σ^2_{total}) ดังนี้

$$\%GR\&R = 100 (\sigma^2 / \sigma^2_{\text{total}})$$

โดยทั่วไปแล้ว กำหนดเกณฑ์ยอมรับความสามารถของระบบการวัด ดังนี้ ถ้าค่า %GR&R น้อยกว่า 10% สามารถยอมรับความสามารถของระบบการวัดได้ ถ้าค่าอยู่ระหว่าง 10%-30% ยอมรับได้ โดยขึ้นกับปัจจัยเกี่ยวข้อง

อื่นๆ เช่น การประยุกต์ใช้ ต้นทุนอุปกรณ์การวัด แต่ถ้าค่ามากกว่า 30% ระบบการวัดต้องปรับปรุง (กิตติศักดิ์, 2553, Sumasto et al., 2023)

การศึกษาครั้งนี้มีตัวแปรต้นคือพนักงานวัดและวิธีวางชิ้นงานบนช่องวัด ตัวแปรควบคุมคือชิ้นงานฟันเทียมที่มีเฉดสีแตกต่างกัน 13 สี ที่ระบุรหัสสีโดยบริษัทผู้ผลิต เครื่องวัดสี และสภาพแวดล้อมในการวัด ตัวแปรตามคือความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการวัดเหมือน โดยตั้งสมมุติฐานว่า ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานวัดหรือวิธีวางชิ้นงานบนช่องวัด และความสามารถในการวัดซ้ำระหว่างพนักงานวัดหรือระหว่างวิธีวางชิ้นงานบนช่องวัด มีค่า %GR&R อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

พนักงานวัดมีจำนวน 4 คน คือ นักวิทยาศาสตร์ที่มีความชำนาญและมีประสบการณ์ในการวัดสี (พนักงานชำนาญการ) 2 คน และผู้ที่ไม่เคยใช้เครื่องมือวัดสีมาก่อน แต่ได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการวัดชิ้นพื้นฐานแล้ว (พนักงานใหม่) 2 คน กำหนดให้พนักงานแต่ละคนวัดเฉดสีฟันเทียมแต่ละซี่แบบสุ่ม วัดซ้ำซี่ละ 3 ครั้ง ภายในช่วงเวลาเดียวกัน คือระหว่างเวลา 10.00 - 12.00 น. นำผลการวัดค่าสีของพนักงานแต่ละคนมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อประเมินความผันแปรที่เกิดจากชิ้นงานและระบบการวัด และวิเคราะห์หาสาเหตุที่เป็นแหล่งความแปรปรวนของข้อมูล ถ้า %GR&R มีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ให้ปรับปรุงในส่วนของพนักงานวัดและวิธีวางชิ้นงานบนช่องวัด

วิธีวัดสี

ใช้แถบเทียบสีฟันเทียมยี่ห้อ Major Dent (Tooth color shade guide, product code S4014 ผลิตโดยบริษัท Major Prodotti Dentari S.p.A. ประเทศอิตาลี) เป็นชิ้นงานทดสอบ มีเฉดสีฟันที่แตกต่างกันจำนวน 13 สี (ภาพที่ 1) วัดค่าสีระบบ CIELAB ของเฉดสีฟันทุกซี่ก่อนการศึกษา ซึ่งประกอบด้วยค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง-เขียว (a^*) และค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*) พบว่าเฉดสี 5D เป็นสีที่มีค่า L^* a^* และ b^* อยู่กึ่งกลางของเฉดสีฟันทุกซี่ จึงกำหนดให้เฉดสี 5D เป็นชิ้นงานมาตรฐาน (Standard) เพื่อใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสีกับฟันเทียมซี่อื่นอีก 12 ซี่ (Samples) โดยใช้เครื่องวัดสีแบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (HunterLab, ColorQuest XE, Hunter Associates Laboratory Inc, USA) ปรับค่าเครื่องวัดสีด้วยอุปกรณ์มาตรฐานตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตก่อนการวัดชิ้นงาน กำหนดทิศทางของมุมมองเป็นแบบ 10 องศา ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D_{65} ตามมาตรฐาน ISO7491:2000 (International Standards, 2000) ใช้ช่องวัดแบบหน้ากากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร วัดสีตามระบบ CIELAB คือ แสดงค่าสีฟันเทียมแต่ละซี่ เป็นค่า L^* a^* และ b^* และให้โปรแกรมของเครื่องวัดสี คำนวณความแตกต่างสีรวม (ΔE) ของเฉดสีฟันเทียมแต่ละซี่กับซี่ 5D เพื่อแสดงเป็นค่า ΔE ตามสมการ ต่อไปนี้

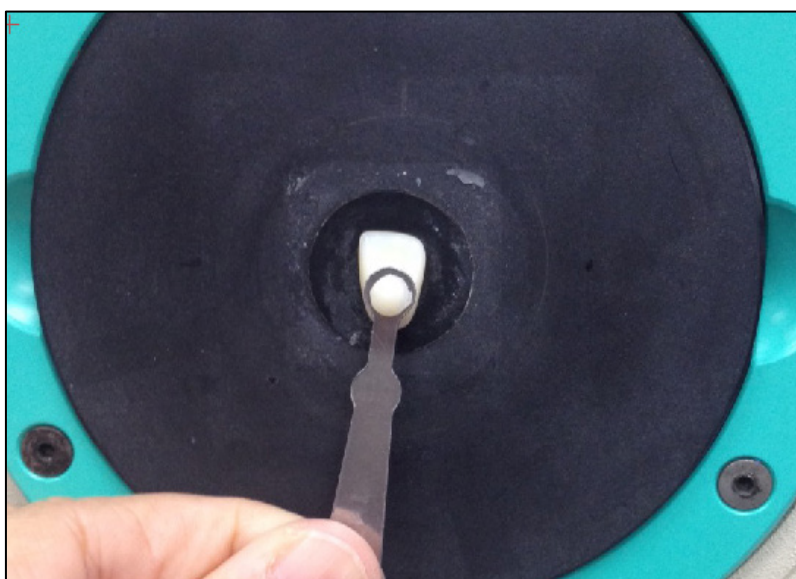
$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

เมื่อ ΔL^* Δa^* และ Δb^* คือ ค่า L^* a^* และ b^* ที่แตกต่างกันของวัตถุ 2 ชิ้น ตามลำดับ

วิธีวัด ให้พนักงานวัดใช้มือจับที่ก้านยึดเฉดสีฟันเทียมซี่ 5D เป็นซี่แรก เพื่อใช้เป็นชิ้นงานมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าสีกับเฉดสีฟันเทียมซี่อื่น วางซี่ฟันเทียมด้านหน้าให้แนบกับช่องวัด ใช้สายตาระยะวางชิ้นงานให้ตรงกึ่งกลางช่องวัด (ภาพที่ 2) แล้วกดปุ่มวัดในโปรแกรมวัดสีของเครื่อง โปรแกรมจะบันทึกค่าสีตามระบบ CIELAB จากนั้นวัดเฉดสีฟันซี่อื่นแบบเดียวกัน และคำนวณค่า ΔE เปรียบเทียบกับเฉดฟันสี 5D



ภาพที่ 1 แถบเทียบสีฟันที่ใช้เป็นชิ้นงานในการศึกษา



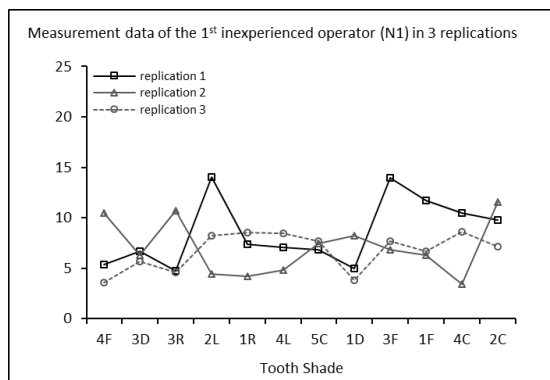
ภาพที่ 2 วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดแบบไม่กำหนดตำแหน่ง

หลังจากวัดจนครบทั้ง 12 สี แล้ว ให้วัดซ้ำด้วยวิธีการเดิมอีก 2 ครั้ง ก่อนนำค่า ΔE ที่วัดได้ของพนักงานทั้ง 4 คน มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two Ways ANOVA) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ SPSS (IBM SPSS Statistics for Windows, Version 29.0) จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความผันแปรในรูปแบบการวัดซ้ำ และการวัดเหมือน ตามวิธีที่ Hessing (2016) ได้แสดงการคำนวณไว้

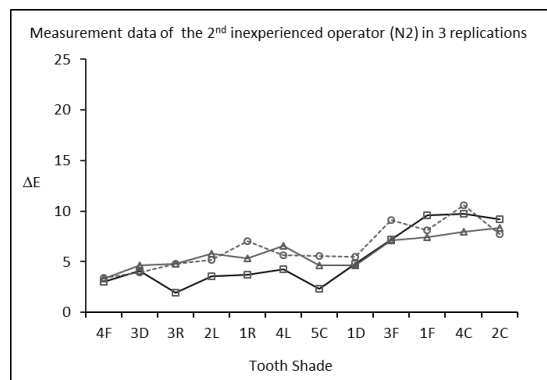
ถ้าพบว่าการวัดของพนักงานทั้ง 4 คน มีผลทำให้ความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าสูงกว่าความแปรปรวนของชิ้นงาน ให้หาแนวทางแก้ไขปรับปรุงวิธีวัดเฉดสีฟัน เพื่อให้ %GR&R มีค่าลดลง

ผลการวิจัย

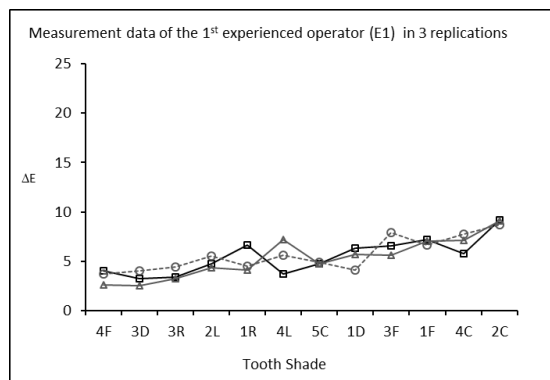
การวัดเฉดสีฟันเทียมรอบที่ 1 ในภาพที่ 3 แสดงค่า ΔE ของแต่ละเฉดสีฟันเมื่อใช้เฉดสี 5D เป็นชิ้นงานมาตรฐาน แขนงนอนในภาพเริ่มจากเฉดสี 4F ที่มีค่า ΔE น้อยที่สุด ไปหาเฉดสี 2C ที่มีค่า ΔE มากที่สุด เส้นกราฟ 3 เส้น ในแต่ละรูป แสดงการวัดซ้ำ 3 ครั้ง ของพนักงานใหม่ (N1 และ N2) พนักงานชำนาญการ (E1 และ E2) ตามลำดับ



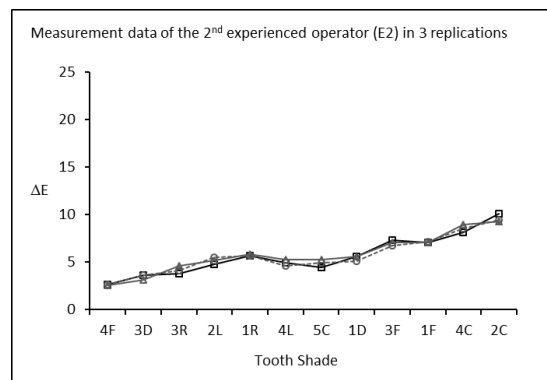
N1



N2



E1

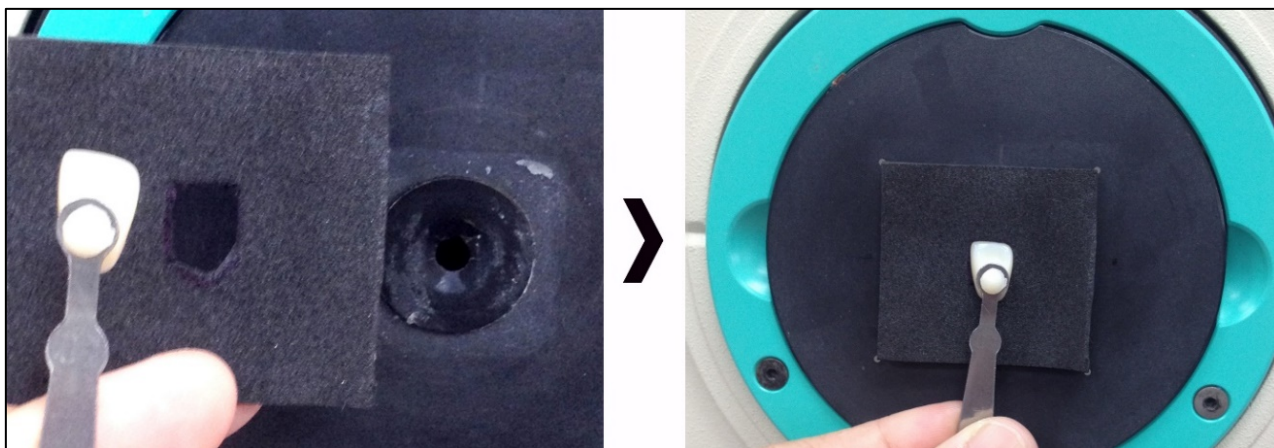


E2

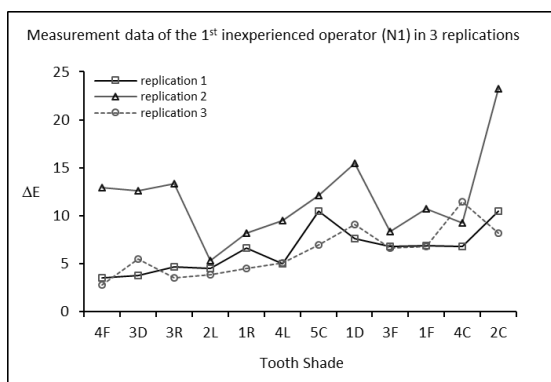
ภาพที่ 3 แสดงค่า ΔE ของเฉดสีฟันเทียมสีต่างๆ เปรียบเทียบกับเฉดสี 5D ของการวัดรอบที่ 1 ใช้วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดแบบไม่กำหนดตำแหน่ง และวัดซ้ำ 3 ครั้ง โดยพนักงานใหม่ (N1 และ N2) ที่ยังไม่ได้รับการอบรมความรู้เรื่องการวัดสีอย่างเข้มข้น และพนักงานชำนาญการ (E1 และ E2)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของการวัดรอบที่ 1 พบว่าพนักงานวัดที่แตกต่างกัน และชิ้นงานที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.00$ และ $P=0.00$ ตามลำดับ) ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานวัดและชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.841$) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่า %GR&R ได้ค่าเท่ากับ 59% (ตารางที่ 1) ซึ่งเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการวัดซ้ำเฉดสีฟันเดียวกันโดยพนักงานใหม่มีความเบี่ยงเบนสูงกว่าค่าที่วัดโดยพนักงานชำนาญการอย่างเห็นได้ชัด เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความแปรปรวนของระบบการวัด (σ^2) มีค่าสูงกว่าความแปรปรวนของชิ้นงาน (σ_p^2) ถึง 146% และจำเป็นต้องปรับปรุงระบบการวัด

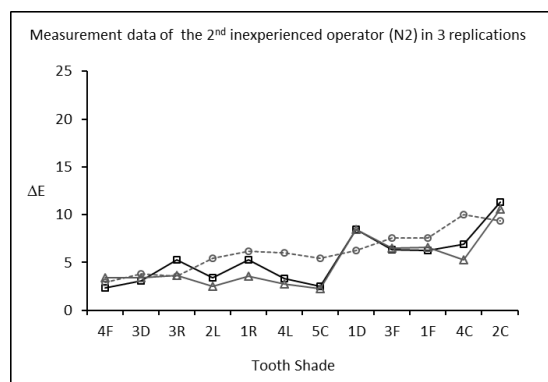
การวัดรอบที่ 2 ปรับปรุงวิธีวัดของพนักงานแต่ละคนให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยควบคุมตำแหน่งการวางสีฟันบนช่องวัดให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง วิธีการ คือ สร้างหน้ากากที่ทำจากแผ่นโฟมนิ่มสีดำขนาด 4x4 ซม. เจาะช่องตรงกลางให้มีรูปร่างเหมือนสีฟันที่นำมาวัด วางทาบแผ่นโฟมนี้นบนช่องวัด ดังภาพที่ 4 ตำแหน่งที่วางแผ่นโฟมเป็นตำแหน่งเดิมทุกครั้งโดยการติดสติ๊กเกอร์เป็นจุดเล็กๆ บนแผ่นช่องวัดตรงตำแหน่งมุมทั้งสี่ของแผ่นโฟม เมื่อนำสีฟันมาวางตรงช่องที่เจาะไว้ สีฟันทุกซี่จะอยู่ในตำแหน่งวัดเดียวกัน จากนั้นวัดเฉดสีฟันทุกซี่อีกครั้ง ผลการวัดของพนักงานแต่ละคน แสดงในภาพที่ 5



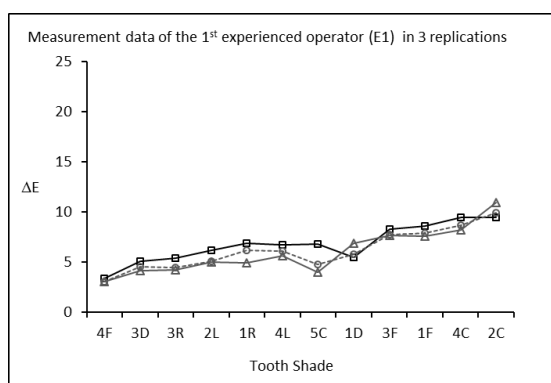
ภาพที่ 4 วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดแบบกำหนดตำแหน่งให้ตรงกันทุกชิ้นงาน โดยใช้หน้ากากโฟมเจาะ



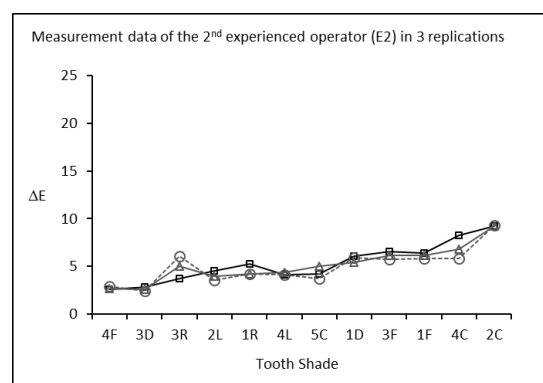
N1



N2



E1



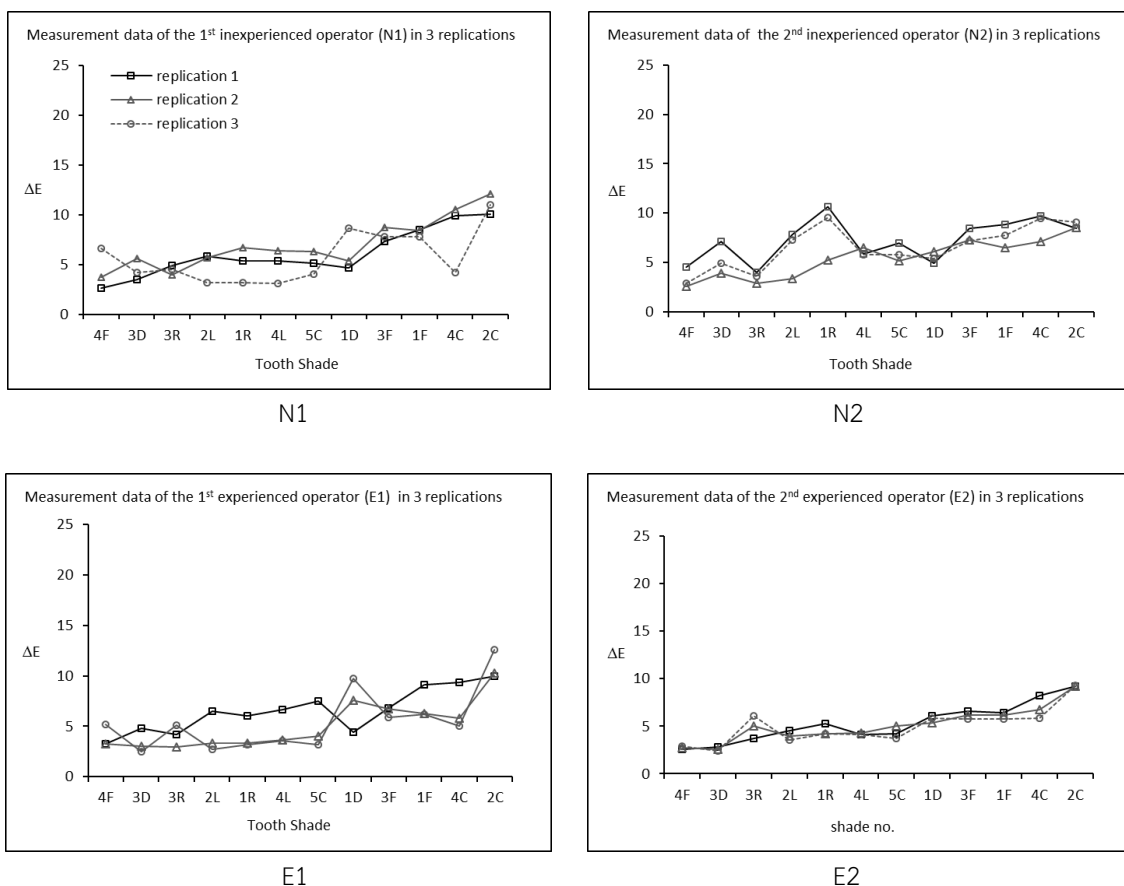
E2

ภาพที่ 5 แสดงค่า ΔE ของเฉดสีฟันเทียมสีต่างๆ เปรียบเทียบกับเฉดสี 5D ของการวัดรอบที่ 2 ใช้วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดแบบกำหนดตำแหน่งด้วยหน้ากากโฟม และวัดซ้ำ 3 ครั้ง โดยพนักงานใหม่ (N1 และ N2) ที่ยังไม่ได้รับการอบรมความรู้เรื่องการวัดสีอย่างเข้มข้น และพนักงานชำนาญการ (E1 และ E2)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ของการวัดรอบที่ 2 พบว่าพนักงานวัดที่แตกต่างกันและชิ้นงานที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.00$ และ $P=0.00$ ตามลำดับ) ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานวัดและชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.852$) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่า %GR&R ได้ค่าเท่ากับ 58% (ตารางที่ 1) ซึ่งใกล้เคียงกับการวัดรอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่าแม้จะปรับปรุงวิธีการวัด โดยกำหนดตำแหน่งแนวนอนของชิ้นงานบนช่องวัดแล้ว ก็ยังมีปัญหาที่เกิดจากพนักงานวัดใหม่ขาดความระมัดระวังขณะวัด ซึ่งน่าจะเป็นเพราะยังไม่มีความรู้ความเข้าใจ

เกี่ยวกับหลักการวัดสีของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้จำเป็นต้องปรับปรุงระบบการวัดในส่วนของพนักงานวัดอีกครั้งหนึ่ง

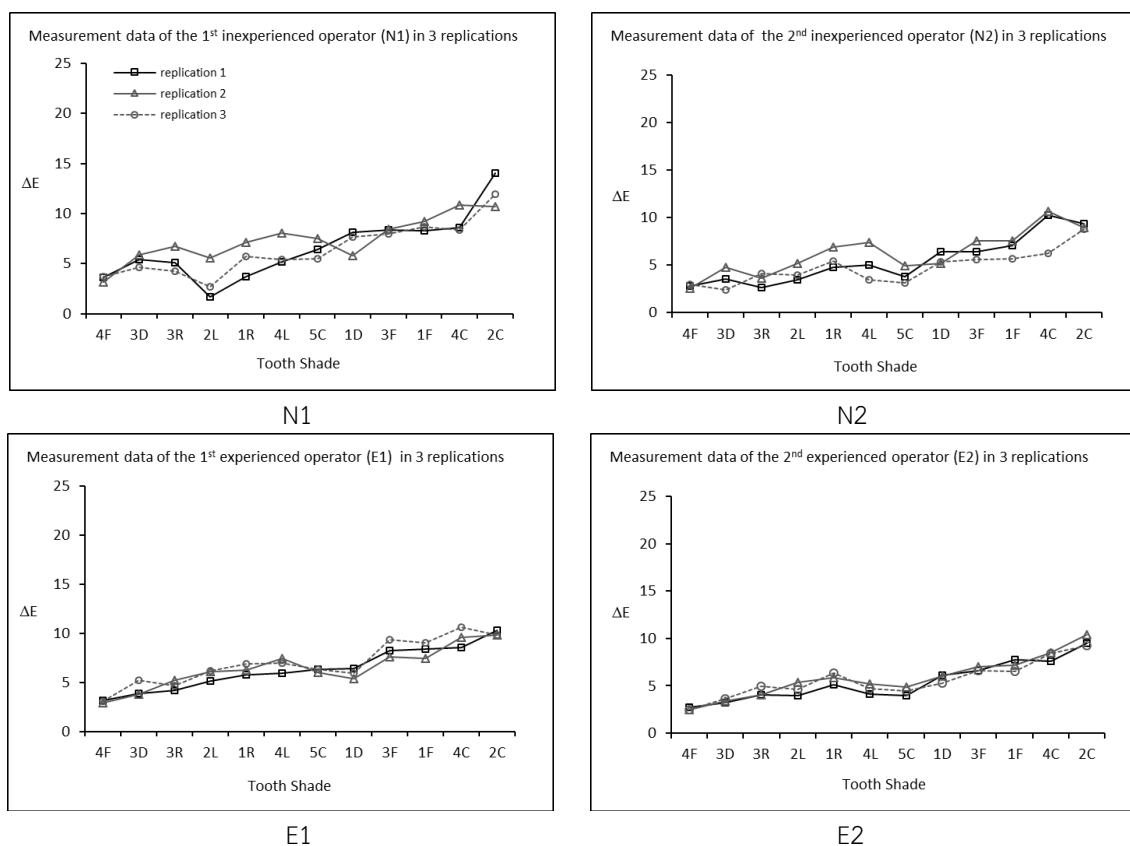
การปรับปรุงกระบวนการวัดในรอบที่ 3 คือ การอบรมพนักงานใหม่ ในเรื่องหลักการทำงานของเครื่องวัดสีแบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์อย่างจริงจังทั้งในภาคทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อให้พนักงานใหม่ มีความเข้าใจถึงเหตุผลของการจัดวางชิ้นงานบนช่องวัด ว่ามีปัจจัยใดบ้างที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดความเบี่ยงเบนของค่าสีที่วัดได้ จากนั้นทำการวัดใหม่เป็นรอบที่ 3 ด้วยวิธีเดียวกับการวัดรอบที่ 1 คือ วางชิ้นงานโดยการกะตำแหน่งลงตรงกึ่งกลางช่องวัดด้วยสายตา เพื่อวัดความแตกต่างของค่าสีเฉดฟันแต่ละซี่ เปรียบเทียบกับเฉดฟันสี 5D จนครบทั้ง 12 ซี่ จากนั้น วัดซ้ำอีก 2 ครั้ง ผลการวัดของพนักงานชำนาญการและพนักงานใหม่ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงค่า ΔE ของเฉดสีฟันเทียมซี่ต่างๆ เปรียบเทียบกับเฉดสี 5D ของการวัดรอบที่ 3 ใช้วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดแบบไม่กำหนดตำแหน่งด้วยหน้ากากโฟม และวัดซ้ำ 3 ครั้ง โดยพนักงานใหม่ (N1 และ N2) ที่ผ่านการอบรมความรู้เรื่องการวัดสีอย่างเข้มข้นแล้ว และพนักงานชำนาญการ (E1 และ E2)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ของการวัดรอบที่ 3 พบว่าพนักงานวัดที่แตกต่างกันและชิ้นงานที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.01$ และ $P=0.00$ ตามลำดับ) ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานวัดและชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.296$) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่า %GR&R ได้ค่าเท่ากับ 39% (ตารางที่ 1) ซึ่งลดลงจากการวัดสองรอบแรกพอสมควร แสดงให้เห็นว่าการอบรมความรู้ให้กับพนักงานใหม่มีความสำคัญมาก แต่ความแปรผันที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลจากวิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดร่วมด้วย จึงได้ปรับปรุงการวัดเพิ่มเป็นรอบที่ 4 โดยกำหนดตำแหน่งวางชิ้นงานบนแผ่นโฟมกำหนดตำแหน่งบนช่องวัด แบบเดียวกับการวัดรอบที่ 2 เพื่อปรับปรุงระบบการวัดในส่วนของวิธีการวัดอีกครั้งหนึ่ง

การวัดสีเฉดฟันในรอบที่ 4 ของพนักงานชำนาญการ และพนักงานใหม่ที่ได้รับการอบรมความรู้เรื่องการวัดสีอย่างเข้มข้น และกำหนดตำแหน่งวางชิ้นงานที่แน่นอนด้วยหน้ากากโฟม แสดงผลดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงค่า ΔE ของเฉดสีต่างๆ เปรียบเทียบกับเฉดสี 5D ของการวัดรอบที่ 4 ใช้วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัดแบบกำหนดตำแหน่งด้วยหน้ากากโฟม และวัดซ้ำ 3 ครั้ง โดยพนักงานใหม่ (N1 และ N2) ที่ผ่านการอบรมความรู้เรื่องการวัดสีอย่างเข้มข้นแล้ว และพนักงานชำนาญการ (E1 และ E2)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ของการวัดรอบที่ 4 พบว่าพนักงานวัดที่แตกต่างกันและชิ้นงานที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.00$ และ $P=0.00$ ตามลำดับ) ขณะที่อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานวัดและชิ้นงานไม่มีผลต่อค่าที่วัดได้ ($P=0.141$) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่า %GR&R ได้ค่าเท่ากับ 23% (ตารางที่ 1) เป็นผลจากการที่ความแปรปรวนของระบบการวัดมีค่าลดลงมากคิดเป็น 30% ของความแปรปรวนจากชิ้นงานเท่านั้น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า ΔE ของเฉดสีฟัน ก่อนและหลังปรับปรุงระบบการวัด

ความแปรปรวน	การวัดรอบที่ 1	การวัดรอบที่ 2	การวัดรอบที่ 3	การวัดรอบที่ 4
ความแปรปรวนจากระบบการวัด (σ^2)	3.538	5.297	2.241	1.338
ความแปรปรวนจากชิ้นงาน (σ^2_p)	2.417	3.798	3.247	4.447
ความแปรปรวนรวมทั้งหมด (σ^2_{total})	5.955	9.095	5.778	5.785
% σ^2/σ^2_p	146 %	139 %	69 %	30 %
% GR&R	59 %	58 %	39 %	23%

เมื่อการปรับปรุงกระบวนการวัดสีในรอบที่ 4 ทำให้ %GR&R มีค่าลดลงเหลือ 23% เป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงควรกำหนดขั้นตอนปฏิบัติสำหรับพนักงานวัดใหม่ ซึ่งได้แก่ นักศึกษาหรือนักวิจัยที่ยังไม่เคยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ มาก่อน ดังนี้

1. พนักงานวัดใหม่ ต้องได้รับการอบรมจากนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ ในหัวข้อต่อไปนี้ ก่อนใช้งาน

- ความรู้เรื่องทฤษฎีสี องค์ประกอบของสี และค่าสีตามมาตรฐานต่างๆ
- หลักการวัดสีด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- ความสำคัญของตำแหน่งวางชิ้นงานบนช่องวัด และสภาพแวดล้อมอื่นๆ

2. ชิ้นงานที่รูปร่างไม่สมมาตรหรือมีขนาดใกล้เคียงช่องวัด ต้องทำหน้าฉากที่มีช่องเจาะเท่ากับรูปร่างชิ้นงานเพื่อกำหนดให้ชิ้นงานวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกันบนช่องวัด

3. ทำการวิเคราะห์ระบบการวัด โดยสุ่มชิ้นงาน 10 ชิ้น ให้ครอบคลุมค่าสีที่ต้องการวัด ให้พนักงานวัดใหม่กับนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ วัดค่าซ้ำแต่ละชิ้นงานอย่างน้อย 3 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ถ้า %GR&R อยู่ในค่าที่ยอมรับได้ คือ ไม่เกิน 30% จึงยอมรับให้พนักงานวัดใหม่ใช้เครื่องมือได้

อภิปรายผล

การศึกษานี้ได้วัดสีของเฉดสีพื้นและเก็บข้อมูลค่าสีตามระบบ CIELAB ทุกค่า แต่เลือกใช้ค่า ΔE ในการวิเคราะห์ระบบการวัดสี เนื่องจาก ค่า ΔE เป็นค่าที่ใช้ประเมินความแตกต่างของสีวัตถุ 2 ชิ้น ว่ามีสีเหมือนกันใกล้เคียงกัน หรือแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด ทั้งนี้ขึ้นกับสภาวะแวดล้อมในขณะนั้นด้วย Kuehni et al. (1979) รายงานว่าภายใต้เงื่อนไขการทดลองในห้องปฏิบัติการ มนุษย์สามารถแยกความแตกต่างของสีวัตถุ 2 ชิ้น ที่มีค่า ΔE ตั้งแต่ 1 ขึ้นไป ขณะที่ Johnson and Kao (1989) รายงานว่าในสภาวะช่องปาก สายตามนุษย์จะแยกความแตกต่างของสีวัตถุ 2 ชิ้น ได้ เมื่อค่า ΔE เท่ากับ 3.7 ขึ้นไป อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเครื่องวัดสีแบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สามารถวัดและเทียบเฉดสีพื้นได้ถูกต้องถึงร้อยละ 83.3 ขณะที่สายตามนุษย์สามารถเทียบเฉดสีพื้นได้ถูกต้องเพียงร้อยละ 26.6 (Paul et al., 2002) แต่การใช้งานเครื่องวัดสีให้อ่านค่าถูกต้องแม่นยำ ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องอีกหลายปัจจัยซึ่งจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ระบบการวัดเพื่อลดความผิดพลาดในการวัดให้เหลือน้อยที่สุด

เครื่องวัดสีที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อการวิจัย จึงเป็นเรื่องปกติที่จะมีผู้มาใช้งานหลากหลาย ตั้งแต่ อาจารย์หรือนักวิจัยที่มีทักษะสูงในการใช้เครื่องมือ จนถึงนักศึกษาที่ไม่เคยใช้เครื่องมือมาก่อนเลย เช่น ในกลุ่มวิจัยนักศึกษาระดับปริญญาตรี เมื่อมาใช้เครื่องวัดสี ในกลุ่มอาจมีผู้วัดมากกว่า 1 คน หรือไม่มีการระบุผู้ใช้งานในกลุ่มที่แน่นอน ชิ้นงานที่นำมาวัดก็มีทั้งสีพื้นและวัสดุบูรณะฟันที่เตรียมเป็นรูปร่างต่างๆ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้เป็นแถบเทียบสีรูปซี่ฟันเทียมพลาสติก ขนาดประมาณ 8x12 มิลลิเมตร (ด้านกว้างและยาวสุด) ทำให้ไม่สามารถใช้ช่องวัดมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.5 มิลลิเมตร ได้ จำเป็นต้องใช้ช่องวัดแบบหน้าฉากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของชิ้นงานซี่ฟันและวิธีการวัด คือ การวางซี่ฟันผิวโค้งลงบนช่องวัดโดยตรงค่อนข้างยาก เพราะขนาดที่เล็กและผิวโค้งอาจปิดช่องวัดได้ไม่หมด ทำให้มีแสงจากภายนอกเล็ดลอดเข้าไปในช่องวัดด้วย และตำแหน่งการวางซี่ฟันบนช่องวัดที่ไม่ตรงกันในแต่ละครั้งที่วัด ทำให้เกิดความไม่มั่นใจต่อค่าที่วัดได้ นอกจากนั้นการใช้พนักงานวัดหลายคนที่มีความชำนาญในการวัดต่างกัน มีผลต่อความผันแปรของค่าสีที่วัดได้ และวัดค่าสีชิ้นงานเดียวกันได้แตกต่างกัน

การอบรมความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีสีและวิธีการวัดให้กับพนักงาน มีความสำคัญอย่างมากที่จะช่วยลดความแปรผันของค่าที่วัดได้ จะเห็นได้จากการวัดสีรอบที่ 1 ในภาพที่ 3 ของพนักงานใหม่ (N1 และ N2) วัดค่า ΔE ในชิ้นงานเดียวกัน ซ้ำ 3 ครั้ง มีความแตกต่างสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพนักงานวัดชำนาญการ (E1 และ E2) แม้จะปรับปรุงวิธีการวัดในรอบที่ 2 โดยใช้หน้าฉากโฟมกำหนดตำแหน่งวางชิ้นงานบนช่องวัด ค่า ΔE ที่วัดซ้ำบนชิ้นงานเดียวกันโดยพนักงานใหม่ ก็ยังมีค่าที่แตกต่างกันมาก (ภาพที่ 5)

ปัญหาที่เกิดขึ้นได้รับการปรับปรุงอีกครั้ง โดยการอบรมอย่างเข้มงวดเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสี หลักการของเครื่องมือ วิธีการวัดที่ถูกต้อง รวมถึงข้อควรระมัดระวังขณะวัดให้กับพนักงานใหม่อีกครั้ง เมื่อทดลองวัดค่าสีใหม่เป็น

รอบที่ 3 โดยไม่ใช้แผ่นโฟมกำหนดวางชิ้นงานบนช่องวัด (ภาพที่ 6) และรอบที่ 4 โดยใช้หน้ากากโฟมกำหนดตำแหน่งวางชิ้นงานให้ตรงกันทุกครั้งช่องวัด (ภาพที่ 7) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการวัดซ้ำบนชิ้นงานเดียวกันของพนักงานใหม่มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นกว่าการวัดในสองรอบแรก และทำให้ความแปรปรวนที่เกิดจากระบบการวัด มีค่าน้อยกว่าความแปรปรวนที่เกิดจากชิ้นงาน

ในทางปฏิบัติ เมื่อมีผู้มาขอใช้งานเครื่องวัดสำหรับงานวิจัยในห้องปฏิบัติการที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการ จะให้คำแนะนำการใช้งานในเรื่องการเตรียมชิ้นงาน การเลือกขนาดช่องวัด วิธีวางชิ้นงานบนช่องวัด และวิธีใช้โปรแกรมควบคุมการวัด แต่จะไม่ได้อธิบายถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวัดส้อย่างละเอียดให้กับผู้มาใช้งาน ผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การวัดส้อยีนงานขนาดเล็กโดยผู้ใช้ใหม่ที่ไม่มีประสบการณ์ใช้เครื่องวัดสีก่อน จำเป็นต้องทบทวนวิธีปฏิบัติที่ผ่านมา เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาจากระบบการวัดอีก

การปรับปรุงกระบวนการวัดเฉลี่ยพื้นด้วยเครื่องวัดสีกแบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ในครั้งนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในงานในห้องปฏิบัติการวิจัย แม้จะเป็นเครื่องมือที่มีการสอบเทียบ (Calibrate) เป็นประจำอยู่แล้ว แต่ข้อมูลที่ได้จากการวัดอาจขาดคุณสมบัติด้านความแม่นยำหรือความเที่ยงตรง ที่เกิดจากระบบหรือองค์ประกอบต่างๆ ในการวัด อันได้แก่ เครื่องมือวัด อุปกรณ์จับยึด บุคลากร ฯลฯ จึงมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ระบบการวัด เพื่อลดความแปรผันของข้อมูลที่เกิดจากระบบการวัด โดยเฉพาะในเครื่องมือที่มีผู้ใช้งานจำนวนมาก

สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ระบบการวัดแถบเทียบสีพื้นด้วยเครื่องวัดสีกแบบสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ในครั้งนี้ พบว่าการวัดค่า ΔE ในรอบแรก ร้อยละของความแปรปรวนที่เกิดจากระบบการวัด เปรียบเทียบกับความแปรปรวนที่เกิดจากชิ้นงาน มีค่าสูงถึง 146% แสดงว่าพนักงานและวิธีการวัด เป็นปัจจัยที่ทำให้ผลการวัดมีความผันแปรสูง และมีผลให้ %GR&R มีค่า 59% เกินกว่าค่าที่จะยอมรับความสามารถของระบบการวัดได้ แต่เมื่อทำการกำจัดแหล่งความผันแปรที่มีผลทำให้ระบบการวัดมีความคลาดเคลื่อนนี้ ด้วยการปรับปรุงกระบวนการ คือ อบรมพนักงานวัดใหม่ให้มีความเข้าใจหลักการวัดส้อย่างจริงจัง และทำหน้ากากที่เจาะช่องเท่ากับรูปร่างชิ้นงานวางไว้หน้าช่องวัดเพื่อวางชิ้นงานให้ตรงตำแหน่งช่องวัดทุกครั้ง ผลของการปรับปรุงกระบวนการ พบว่า ร้อยละของความแปรปรวนที่เกิดจากระบบการวัดคิดเป็น 30% ของความแปรปรวนที่เกิดจากชิ้นงาน นั่นคือ ความผันแปรของข้อมูลที่วัดได้ เกิดจากความผันแปรของชิ้นงานเป็นหลัก และ %GR&R มีค่าลดลงเหลือ 23% เป็นค่าที่ยอมรับความสามารถของระบบการวัดได้ จึงได้กำหนดขั้นตอนปฏิบัติสำหรับพนักงานใหม่ เพื่อป้องกันความผิดพลาดของการวัดสีก โดยเฉพาะเมื่อชิ้นงานมีรูปร่างไม่สมมาตรหรือมีขนาดใกล้เคียงช่องวัด ดังนี้คือ 1) ต้องอบรมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการวัดส้อย่างเข้มข้นให้กับพนักงานวัดใหม่ 2) ทำหน้ากากเจาะช่องเพื่อกำหนดให้ชิ้นงานวางอยู่ในตำแหน่งเดียวกันบนช่องวัด 3) ต้องทดสอบพนักงานใหม่ ด้วยวิธีวิเคราะห์ระบบการวัด ให้ %GR&R ไม่เกิน 30% จึงยอมรับให้พนักงานวัดใหม่ใช้เครื่องมือได้

ข้อเสนอแนะการวิจัย

แม้ว่า %GR&R ที่อยู่ระหว่าง 10%-30% จะเป็นค่าที่ยอมรับได้แบบมีเงื่อนไขจากปัจจัยเกี่ยวข้องอื่นๆ ซึ่งในที่นี้ คือชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตรและมีขนาดใกล้เคียงช่องวัด และข้อจำกัดที่สถาบันการศึกษาจะมีนักศึกษามาเป็นพนักงานวัดใหม่ทุกปี อย่างไรก็ตาม ในอนาคตยังจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการ เพื่อทำให้ค่า %GR&R น้อยกว่า 10% เช่น ให้ผู้ใช้ใหม่ได้ฝึกการวัดสีกด้วยวิธีรูปร่างแตกต่างกันหลายๆ แบบ เพื่อฝึกความชำนาญและมีประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือ ออกแบบหน้ากากโดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติแทนการใช้แผ่นโฟมเพื่อให้ช่องเจาะมีขนาดพอดีกับชิ้นงานและวางชิ้นงานได้โดยไม่ต้องใช้มือช่วยจับเพื่อลดการสั่นของมือและความเมื่อยล้าขณะวัด ศึกษาปัจจัยอื่นเพิ่มเติมที่อาจมีผลต่อค่าสีกที่วัดได้ เช่น การควบคุมระยะเวลาวางชิ้นงานหรือเอาชิ้นงานออก หรือในกรณีนักศึกษา

ทำงานวิจัยเป็นกลุ่ม ให้เลือกสมาชิกในกลุ่มเพียง 1 คน เป็นพนักงานวัด เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดจากผู้วัดหลายคน เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาครั้งนี้

บรรณานุกรม

- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2553). *การวิเคราะห์ระบบการวัด MSA* (281 หน้า). สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น): กรุงเทพฯ. พิมพ์ครั้งที่ 7.
- เฉลิมศักดิ์ ถาวรวัตร และ ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์. (2565). การพัฒนาอุปกรณ์วัดชุดสายไฟ กรณีศึกษาโรงงานผลิตชุดสายไฟในรถยนต์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏธนบุรี*, 20(1), 25-35.
- ธีระพงษ์ ทับพร และ เอกพล ทับพร. (2563). การวิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับป้องกันความผิดพลาดการตรวจชิ้นงานวาล์วลม : กรณีศึกษาบริษัท ีรับเบอร์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี*, 4(1), 64-77.
- เอราวิล ถาวร. (2560). การวิเคราะห์ระบบการวัดสำหรับป้องกันความผิดพลาดการตรวจชิ้นงานวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรม. *วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต*, 7(1), 140-153.
- Bolt, R. A., Bosch, J. J., & Coops, J. C. (1994). Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. *Physics in Medicine and Biology*, 39(7), 1133-1142.
- Ferreira, I. S. B., Peruchi, R. S., Fernandes, N. J., & Rotella Junior, P. (2020). Measurement system analysis in angle of repose of fertilizers with distinct granulometries. *Measurement*, 170, 108681.
- Hessing, T. (2016). *Gage Repeatability and Reproducibility (R&R)*. Retrieved from <https://sixsigmastudyguide.com/repeatability-and-reproducibility-rr>
- Hunter Associates Laboratory. (2016). Masked 4 mm diameter port for ColorQuest XE and UltraScan XE. Hunter Lab. Retrieved from <https://support.hunterlab.com/hc/en-us/articles/202023245-Masked-4-mm-diameter-port-for-ColorQuest-XE-and-UltraScan-XE>
- International Organization for Standardization. (2000). *Determination of Color Stability of Dental Polymeric Materials*. ISO 7491:2000.
- Johnston, W. M., Kao, E. C. (1989). Assessment of Appearance Match by Visual Observation and Clinical Colorimetry. *Journal of Dental Research*, 68(5), 819-822.
- Kuehni, R. G., & Marcus, R. T. (1979). Experiment in visual scaling of small color differences. *Color Research and Application*, 4(2), 83-91.
- Paul, S., Peter, A., Pietrobon, N., & Hämmerle, C. H. F. (2002). Visual and Spectrophotometric Shade Analysis of Human Teeth. *Journal of Dental Research*, 81(8), 578-582.
- Peruchi, R. S., Balestrassi, P. P., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., & Carmelossi, M. S. (2013). A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. *International Journal of Production Economics*, 144(1), 301-315.

Sumasto, F., Nugroho, Y. A., Purwojatmiko, H., Wirandi, M, Imansuri, F., & Aisyah, S. (2023).
Implementation of Measurement System Analysis to Reduce Measurement Process Failures
on Part Reinf BK6. *Indonesian Journal of Industrial Engineering & Management*, 4(2), 212-
220.