



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการประเมินความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

โดย นภัสธ์ จันทรัมย์ และ จูตินันท์ รัตนพรหม

ตุลาคม 2556

สัญญาเลขที่ RDG 5550068

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการประเมินความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

คณะผู้วิจัย

นภัสธ์ จันทรมี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ฐิตินันท์ รัตนพรหม

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ชุดโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

ชื่อโครงการ

(ภาษาไทย)	การประเมินความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์
(ภาษาอังกฤษ)	Evaluation of wear resistance in clay-compound latex composite

หัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด และที่อยู่

ชื่อ-สกุล	นภัสภ์ จันทรมณี
หน่วยงาน	สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
ที่อยู่	มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290
โทรศัพท์/โทรสาร	053-873515 / 053-878225
E-mail address	chantaramee@hotmail.com , napatcm43@gmail.com

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล	ฐิตินันท์ รัตนพรหม
หน่วยงาน	สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
ที่อยู่	มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290
โทรศัพท์/โทรสาร	053-875869 – 71 / 053-878113
E-mail address	thitinun@mju.ac.th

งบประมาณทั้งโครงการ 140,000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ 1 สิงหาคม 2555 – 31 กรกฎาคม 2556

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ต้นทุนพลังงานการผลิตของอุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิม ซึ่งได้แก่ ก๊าซเหลว ก๊าซธรรมชาติ มีการปรับราคาตามราคาน้ำมันในตลาดโลก ซึ่งจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทั้งยังมีนโยบายจากภาครัฐที่ยกเลิกการตรึงราคาก๊าซเหลวที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ทำให้การผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกแบบดั้งเดิมบางประเภทในราคาถูกล้มเหลวจะเป็นไปไม่ได้

จากการศึกษา เรื่อง การใช้ยางชันเป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการผลิตภาชนะดินเผา (RDG 5450045) พบว่าการใช้น้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 7 และ 9 โดยน้ำหนักของน้ำดิน และอบชิ้นงาน

ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นงานมีค่าความทนแรงดัด (Characteristic strength) เป็น 212 และ 259 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าของชิ้นงานที่ไม่เติมน้ำยางคอมปาวด์และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (75.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) นอกจากนี้การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เติมน้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 7 และ 9 มีค่าประมาณร้อยละ 2 ซึ่งแสดงว่าช่องอากาศภายในชิ้นงานมีปริมาณน้อย

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนในระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการวัลคาไนซ์เพื่อเชื่อมโมเลกุลยางให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ซึ่งไม่ใช้การเผาผนึก (Sintering) เพื่อลดช่องว่างระหว่างอนุภาคผงดินหากยางวัลคาไนซ์ไม่สามารถยึดเกาะอนุภาคผงดินเข้าไว้ด้วยกันได้ขณะทำการตกแต่งชิ้นงาน เช่น การขัด การเจาะ แล้ว ชิ้นงานนั้นจะมีโอกาสที่จะกร่อน และ/หรือ แตกหัก ได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ในส่วนผสม และอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 130 – 150 องศาเซลเซียส ผิวชิ้นงานจะปรากฏสีน้ำตาลซึ่งเป็นสีของยางอย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นข้อด้อยในเชิงการเพิ่มมูลค่า

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นการศึกษา 2 ประเด็นหลัก คือ การประเมินความทนต่อการขัดสีจากการวัดค่าความแข็งร่วมกับการทดสอบความทนต่อการขัดสี และ การผสมสารให้สีในเนื้อผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และคาดว่าจะมีความเป็นไปได้ในการผลิตสินค้าเลียนแบบเซรามิกบางประเภทโดยเฉพาะอย่างยิ่งเซรามิกแบบดั้งเดิมกลุ่มเอิร์ทเทนแวร์ ที่ต้องใช้อุณหภูมิเผา 900 – 1100 องศาเซลเซียส

วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์
3. เพื่อศึกษาปริมาณการเติมสารที่ทำให้เกิดสีและลักษณะสีปรากฏในผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

ผลการดำเนินงาน

ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ เป็นวัสดุอ่อน ค่าความแข็งแปรผันตรงกับการเพิ่มน้ำหนักกด (Reverse indentation size effect หรือ RISE) ค่าน้ำหนักกดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งสำหรับวัสดุนี้ คือ 0.5 kgf โดยมีค่าความแข็งเป็น 11 เมกะปาสคาลและไม่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ แต่การเพิ่มปริมาณน้ำยางคอมปาวด์จากร้อยละ 3

เป็นร้อยละ 9 ทำให้ความทนแรงดัดสูงขึ้น โดยค่าความทนแรงดัดเพิ่มขึ้นจาก 134 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น 259 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ดียิ่งขึ้น โดยปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกลดลงจาก 1378 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เป็น 330 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้นความทนแรงดัดและความทนต่อการขัดสีที่วัดจากการวัดความยาวรอยสึกจึงสามารถใช้เป็นสมบัติชี้วัดศักยภาพการเป็นตัวเชื่อมประสานของน้ำยางคอมปาวด์ได้เหมาะสมมากกว่าสมบัติด้านความแข็ง

การผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งผ่านการให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มีค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมเป็น 15 phr แต่การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นไม่สามารถช่วยลดโทนสีเหลืองที่คาดว่าเกิดจากการไหม้ของยางเนื่องมาจากการอบที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงได้ นอกจากนี้การใช้สีธรรมชาติสีแดงปริมาณไม่เกิน 10 phr ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์มีค่าดัชนีความขาวและค่าความสว่างต่ำลงและเพิ่มโทนสีเหลืองมากขึ้น ขณะที่โทนสีแดงไม่เด่นชัด

สรุปผลการวิจัย

น้ำยางคอมปาวด์ที่ผสมลงในระบบทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคดินโดยแทรกตามช่องว่างและยึดเกาะอนุภาคดินเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งนอกจากจะส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นแล้วยังทำให้ความทนต่อการขัดสีดียิ่งขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความแข็งซึ่งทดสอบโดยใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ส น้ำหนักกด 0.5 kgf ยังผลให้ไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ดังกล่าวได้

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ซึ่งเตรียมในลักษณะของ 50% ดิสเปอร์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 15 phr เหมาะสมสำหรับการปรับความขาวของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงได้ โดยแสดงค่าดัชนีความขาวระดับ 78 – 79 ค่าความสว่าง L^* ระหว่าง 81 – 86 ค่าความเป็นสีแดง $+a^*$ 2 – 4 และค่าความเป็นสีเหลือง $+b^*$ ประมาณ 13 – 14

การใช้สีธรรมชาติสีแดง ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์มีค่าดัชนีความขาวและค่าความสว่างต่ำลง โดยแสดงค่าดัชนีความขาวเพียง 63 – 66 ค่าความสว่าง L^* 75 – 79 ค่าความเป็นสีแดง $+a^*$ 3 – 7 และ ค่าความเป็นสีเหลือง $+b^*$ 26 – 28

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

ศึกษาผลของการปรับสูตรน้ำยางคอมปาวด์ เช่น ผลของสัดส่วนการใช้กำมะถันต่อสารตัวเร่ง ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมระหว่างดินและน้ำยางคอมปาวด์ โดยมุ่งเป้าหมายเพื่อลดอุณหภูมิอบให้ต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

1. นำเสนอผลงานในที่ประชุมทางวิชาการ
2. แลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างหน่วยงาน เช่น สาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และสาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตลอดจนผู้ประกอบการที่สนใจ
3. ฝึกอบรม หรือ สาธิต หรือ ให้บริการทางวิชาการ เรื่อง การผลิตผลิตภัณฑ์สินค้าเลียนแบบเซรามิก เพื่อเผยแพร่ความรู้แก่ผู้ประกอบการรายย่อย หรือผู้สนใจทั่วไป

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์มีลักษณะเป็นวัสดุอ่อน ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สแปรผันตรงกับการเพิ่มน้ำหนักกด ค่าน้ำหนักกดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งสำหรับวัสดุนี้ คือ 0.5 kgf โดยมีค่าความแข็งเป็น 11 เมกะปาสคาลและไม่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ แต่การใช้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นทำให้ความทนแรงดัดสูงขึ้น และความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ดียิ่งขึ้น การประเมินความทนต่อการขัดสีจึงไม่สามารถประเมินจากการทดสอบความแข็งได้ ดังนั้นความทนแรงดัดและความทนต่อการขัดสีที่วัดจากการวัดความยาวรอยสึกจึงสามารถใช้เป็นสมบัติชี้วัดศักยภาพการเป็นตัวเชื่อมประสานของน้ำยางคอมปาวด์ได้เหมาะสมมากกว่าสมบัติด้านความแข็ง

การผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งผ่านการให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มีค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมเป็น 15 phr แต่การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นไม่สามารถช่วยลดโทนสีเหลืองที่คาดว่าจะเกิดจากการไหม้ของยางเนื่องมาจากการอบที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงได้ นอกจากนี้การใช้สีธรรมชาติสีแดงปริมาณไม่เกิน 10 phr ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์มีค่าดัชนีความขาวและค่าความสว่างต่ำลงและเพิ่มโทนสีเหลืองเด่นชัดกว่าโทนสีแดง

Abstract

By means of the Vickers hardness test, the clay-compound latex composites were defined as a soft material showing hardness increases with increasing load. The critical indentation load for these materials was found to 0.5 kgf and Vickers hardness number was approximately 11 MPa, independent of the proportion of compound latex. In contrast, the composites containing higher proportion of compound latex exhibited better flexural strength and wear resistance. Therefore, wear resistance of the clay-compound latex composites was unable to predict from the hardness. Then, the flexural strength and wear resistance which directly figured out from the abrasion test were noted as an appropriate factor for indentify the potential of compound latex as the binder more than the hardness.

The clay-compound latex composites that containing titanium dioxide of 15 phr has optimum whiteness index when heated at 150 °C for 12 hrs. However, the yellowish appearance of composites caused by the burnt latex was not reduced by titanium dioxide. When natural red dye of less than 10 phr was added, both whiteness index and brightness of the composites were reduced, and enhanced the yellowish appearance more than the redness.

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

อุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิมในประเทศไทย มีต้นทุนการผลิตหลักได้แก่ วัตถุดิบ พลังงาน แรงงาน และค่าเสื่อมราคา ข้อมูลจากรายงานการศึกษาฉบับสมบูรณ์ โครงการจัดทำแผนแม่บท อุตสาหกรรมรายสาขา (สาขาเซรามิกและแก้ว) ระบุว่าต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิมขึ้นอยู่กับประเภทผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามภาพรวมของต้นทุนทางด้านวัตถุดิบคิดเป็นสัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 22 – 58 ต้นทุนพลังงานมีสัดส่วนร้อยละ 8 – 20 ต้นทุนแรงงานมีสัดส่วนร้อยละ 8 – 38 และต้นทุนค่าเสื่อมราคามีสัดส่วนร้อยละ 6 – 10 [1]

ในอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางและขนาดเล็กจะใช้ก๊าซเหลว (Liquid petroleum gas, LPG) เป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิต ขณะที่อุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะมีการนำก๊าซธรรมชาติ (Natural gas, NG) มาใช้ร่วมด้วย เชื้อเพลิงดังกล่าวมีการปรับราคาขึ้นลงตามราคาน้ำมันปิโตรเลียมในตลาดโลก ในช่วงเวลาที่ผ่านมาราคาก๊าซ LPG ปรับตัวสูงขึ้นและมีแนวโน้มที่จะปรับตัวสูงขึ้นอีกเป็นระยะๆ

การแก้ปัญหาด้านต้นทุนพลังงานนั้นมีแนวทางจัดการหลากหลายวิธี อาทิ การปรับปรุงประสิทธิภาพเตาเผาลดการสูญเสียความร้อนจากเตา การใช้ถ่านหินสะอาดเป็นเชื้อเพลิงทดแทน การพัฒนาเนื้อดินและเคลือบเพื่อเผาอุณหภูมิต่ำ ตลอดจนการทำเซรามิกไม่เผา (Ceramic – like state without firing) ซึ่งแนวทางการจัดการต่างๆ โดยเฉพาะแนวทางของการพัฒนาเนื้อดินและการทำเซรามิกไม่เผานั้นควรต้องคงไว้ซึ่งวิธีการหรือขั้นตอนการผลิตดั้งเดิมที่สถานประกอบการได้ดำเนินการอยู่ ทั้งในด้านการเตรียมดินและ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

จากการศึกษาถึง อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาอบที่ส่งผลต่อความทนแรงดัด และค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานจากดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ ในโครงการวิจัย เรื่อง การใช้น้ำยางชันเป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการผลิตภาชนะดินไม่เผา [2] พบว่าการใช้น้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 7 และ 9 โดยน้ำหนักของน้ำดิน และอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นงานมีค่า Characteristic strength เป็น 212 และ 259 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าของชิ้นงานที่ไม่เติมน้ำยางคอมปาวด์และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส (75.8 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) นอกจากนี้การดูดซึมน้ำของชิ้นงานที่เติมน้ำยางคอมปาวด์ร้อยละ 7 และ 9 มีค่าประมาณร้อยละ 2 ซึ่งแสดงว่าช่องอากาศภายในชิ้นงานมีปริมาณน้อย

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนในระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการวัลคาไนซ์เพื่อเชื่อมโมเลกุลยางให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ซึ่งไม่ใช้การเผาผนึก (Sintering) เพื่อลดช่องว่างระหว่างอนุภาคผงดิน หากยางวัลคาไนซ์ไม่สามารถยึดเกาะอนุภาคผงดินเข้าไว้ด้วยกันได้ขณะทำการตกแต่งชิ้นงาน เช่น การขัด การเจาะ แล้ว ชิ้นงานนั้นจะมีโอกาสที่จะกร่อน และ/หรือ แตกหัก ได้ง่าย

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ในส่วนผสม และอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 130 – 150 องศาเซลเซียส ผิวชิ้นงานจะปรากฏสีน้ำตาลซึ่งเป็นสีของยางอย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นข้อด้อยในเชิงการเพิ่มมูลค่า

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งประเด็นการศึกษา 2 ประเด็นหลัก คือ การประเมินความทนต่อการขัดสีจากการวัดค่าความแข็งร่วมกับการทดสอบความทนต่อการขัดสี และการผสมสารให้สีในเนื้อผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้

2. วัตถุประสงค์

2.1. วัตถุประสงค์เชิงจุดมุ่งหมาย

2.1.1 เพื่อประเมินความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

2.1.2 เพื่อปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ด้วยการเติมสารที่ทำให้เกิดสี

2.2 วัตถุประสงค์เชิงกิจกรรม

2.2.1 เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

2.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

2.2.3 เพื่อศึกษาปริมาณการเติมสารที่ทำให้เกิดสีและลักษณะสีปรากฏในผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัยและผลงานที่เกี่ยวข้อง

3.1 การประเมินความทนต่อการขัดสี

ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งมีสัดส่วนของดินมากกว่าน้ำยางคอมปาวด์นั้น เมื่อผ่านการอบด้วยอุณหภูมิและเวลาอบที่เหมาะสม จะมีความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ และมีลักษณะแข็งแต่เปราะคล้ายเซรามิก การศึกษาครั้งนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาจากแนวทางการวัดค่าความแข็งและความทนการขัดสีของวัสดุกลุ่มเซรามิก ซึ่งจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความแข็งของตัวอย่างทางเซรามิก พบว่าการวัดความแข็งบนพื้นผิวเซรามิก จำเป็นต้องคำนึงถึง “Indentation size effect” ดังเช่น

Kim, H. *et al* [3] ศึกษาความแข็งของกระเบื้องหลังคา โดยใช้การวัดค่าความแข็งแบบโมห์สเกล (Mohs scale) เพื่อจำแนกประเภทกระเบื้องเป็น “Soft Tile” (ซึ่งมีค่าโมห์สเกล เป็น 3 – 4) และ “Hard Tile” (ซึ่งมีค่าโมห์สเกล มากกว่า 6) จากนั้นจึงใช้เทคนิคการวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro Vickers) และแมโครวิกเกอร์ส (Macro Vickers) เพื่อประเมิน Critical indentation load และ ISE (Indentation size/load effect) boundary ที่เหมาะสมสำหรับ Soft Tile และ Hard Tile ตามลำดับ โดย

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกด (P) และ Vicker Hardness number (HV) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Indentation size (d) และ HV ซึ่งพบว่า Critical indentation load สำหรับ “Soft Tile” คือ 0.5 kgf และ Critical indentation load สำหรับ “Hard Tile” คือ 1 kgf ทั้งยังได้ข้อสรุปว่า P และ d มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ $P = \alpha_1 d + \alpha_2 d^2$ เมื่อ α_1 และ α_2 เป็นค่าคงที่ ซึ่งเป็นสมการที่แปลงมาจากสมการของเมเยอร์ (Meyer's law : $P = Ad^n$)

Sidjanin, L. *et al* [4] วัดความแข็งแบบ Vicker บนผิวกระเบื้องปูพื้น 2 ชุด ซึ่งทำจากวัตถุดิบตั้งต้นต่างกัน โดยแต่ละชุดเผาที่อุณหภูมิ 960 และ 1050 องศาเซลเซียส การทดสอบใช้น้ำหนักกดตั้งแต่ 0.1 kgf – 5 kgf เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง P และ d ซึ่งพบว่า ข้อมูลจากการทดสอบมีทั้งที่สอดคล้องกับทั้งสมการ $P = \alpha_1 d + \alpha_2 d^2$ และ สมการ $P = P_0 + \alpha_1 d + \alpha_2 d^2$ เมื่อ P_0 เป็นค่าคงที่จากการทดสอบ

ค่าความแข็งในบางกรณีไม่แปรผันกับน้ำหนักกด ดังเช่นงานวิจัยของ Gutierrez–Mora F. *et al* [5] ซึ่งศึกษาการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ของวัสดุไบโอโมर्फิคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Biomorphic SiC) ที่เตรียมจากไม้ 3 ชนิด คือ สน ปิץ และยูคาลิปตัส ผลิตโดยใช้ซิลิคอนหลอมเหลวแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของไม้ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอน ทำการทดสอบทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ของวัสดุไบโอโมर्फิคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยใช้น้ำหนักกด 4 ระดับ คือ 50 100 200 และ 500 นิวตัน ใช้เวลาทดสอบ 15 วินาที เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง HV กับ P พบว่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานในบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไม่ขึ้นกับน้ำหนักกดที่ใช้ แต่จะมีค่าขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิคอนคาร์ไบด์ในบริเวณนั้น และค่าความแข็งของบริเวณที่มีรูพรุนจะสอดคล้องกับค่าความแข็งที่ประเมินได้จาก Ryskevitch–type equation คือ $HV = HV_0 \exp(-B \theta)$ โดยที่ HV_0 คือ ค่าความแข็งของวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก B คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับกลไกการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งที่มีความพรุนตัว และ θ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุน

จากที่กล่าวข้างต้น การวัดความแข็งของวัสดุเพื่อให้ได้ค่าที่เชื่อถือได้ จะต้องทดสอบหาน้ำหนักกดที่เหมาะสมสำหรับวัสดุนั้นๆ ซึ่งในการศึกษานี้ใช้หลักการการศึกษาของ Kim, H. *et al* และ Sidjanin, L. *et al* ดังกล่าว ประยุกต์ใช้เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ เพื่อนำค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบตามเงื่อนไขที่ได้นั้น มาประเมินร่วมกับความคงทนต่อการขัดสีซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยการวัดความยาวของรอยลึกที่เกิดจากการขัดถูของจานขัดบนผิวหน้าชิ้นทดสอบภายใต้สภาวะ และวัสดุขัดถูที่กำหนด ด้วยเครื่องมือและวิธีการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2398 เล่ม 6 – 2553

3.2 การปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ด้วยการเติมสารที่ทำให้เกิดสี

ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสื่อนิรภัยที่ให้สีขาวสว่าง นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากมีความเสถียรและไม่เป็นพิษ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบอะนาเทส (Anatase) จะทำให้ยางมีสีขาวกระจ่างกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์ (Rutile) แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์จะทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากการโดนแสงแดดและสภาพแวดล้อมสูงกว่า [6]

การใช้สีเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีสันทันตามต้องการ สีที่ใช้ควรเป็นสารที่ใช้เพียงเล็กน้อยก็ได้สีตามต้องการ ทนต่อแสงและความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตและการใช้งาน ไม่ตกสี ไม่มีผลต่อการทำให้ยางคงรูป ไม่มีผลเสียต่อการคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และราคาเหมาะสม [7]

อย่างไรก็ตาม ในขั้นตอนการเตรียมหรือกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 12 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างหรือผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงมากขึ้น สำหรับการศึกษานี้ จึงใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เพื่อปรับความขาวของผลิตภัณฑ์ ร่วมกับการใช้สีธรรมชาติสีแดง เพื่อปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ และทดสอบความแตกต่างของสีโดยใช้สเกลมาตรฐานการวัดสีแบบ CIE Lab ซึ่งเป็นการวัดความขาวและโทนสี จากตัวแปร L^* a^* b^* โดยที่ L^* หมายถึง ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำหรือสีมืดที่สุด) จนถึง 100 (ขาวหรือสว่างที่สุด) $+a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ $-a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว $+b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีน้ำเงิน

4. วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ประเมินความคงทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่าง

1.1 การเตรียมสารและส่วนผสม

เตรียม ดิสเพอร์ชันของกำมะถัน ดิสเพอร์ชันของซิงค์ไดเอทิลไดไทคาร์บาเมต ดิสเพอร์ชันของซิงค์ออกไซด์ โดยใช้ดินเบนโทไนต์ป้องกันการตกตะกอน และวัลทามอลเป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งเตรียมโดยนำสารเคมีตามสัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผสมลงในขวดพลาสติก ใส่ลูกแก้ว 2 ใน 3 ของขวดพลาสติก ปิดฝาและทำการเขย่าขวดพลาสติกเพื่อให้สารเคมีทั้งหมดผสมเข้ากัน จากนั้นนำไปบดผสมด้วยเครื่องบดลม เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.1 สัดส่วนผสมสำหรับเตรียมสารเคมี

	สารเคมี (กรัม)			ดินเบนโทไนต์ (กรัม)	วัลทามอล (กรัม)	น้ำ (มิลลิลิตร)
	S	ZDEC	ZnO			
ดิสเพอร์ชันของกำมะถัน	50	-	-	1	1	48
ดิสเพอร์ชันของซิงค์ไดเอทิล ไดไทคาร์บาเมต	-	50	-	1	1	48
ดิสเพอร์ชันของซิงค์ออกไซด์	-	-	50	1	1	48

1.2 การเตรียมน้ำดินและน้ำยางคอมปาวด์

1.2.1 การเตรียมน้ำดิน

การเตรียมน้ำดิน เพื่อใช้ผสมกับน้ำยางคอมปาวด์ ซึ่งใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ ใช้สัดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยนำส่วนผสมทั้งหมดไปทำการบดผสมด้วยเครื่องบดผสมบดลม เป็นเวลา 30 นาที น้ำดินที่เตรียมจะถูกปรับให้มีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.68 – 1.70

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนผสมสำหรับการเตรียมน้ำดิน

ส่วนผสม	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)
1. ดินผสมสำเร็จรูป (ความชื้น ~ 15-20%)	641.0
2. โซเดียมซิลิเกต	3.0
3. น้ำกลั่น	120.0

1.2.2 การเตรียมน้ำยางคอมปาวด์

ในการทดลองนี้ใช้น้ำยางชั้น (High ammonia latex) เตรียมเป็นน้ำยางคอมปาวด์ตามสูตรสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สูตรน้ำยางคอมปาวด์

ยางและสารเคมี	น้ำหนักเปียก (กรัม)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)
60% น้ำยางชั้น	167	100
10% ดิสเพอร์ชันของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	4	0.4
50% ดิสเพอร์ชันของกำมะถัน	3	1.5
50% ดิสเพอร์ชันของซิงค์ไดเอทิลไดไทคาร์บาเมต	2	1.0
50% ดิสเพอร์ชันของซิงค์ออกไซด์	3	1.5

1.3 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบได้กำหนดอัตราส่วนผสม ระหว่าง น้ำดินจากดินผสมสำเร็จรูป และ น้ำยางคอมปาวด์ 4 ระดับ คือ การใช้น้ำยางคอมปาวด์ ร้อยละ 3 - 9 โดยน้ำหนัก ซึ่งกำหนดเป็นสูตร KN1-3 KN1-5 KN1-7 และ KN1-9 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สัดส่วนผสมระหว่าง น้ำดิน และน้ำยางคอมปาวด์

	สัดส่วนโดยน้ำหนัก (wt %)				
	PAA	KN1-3	KN1-5	KN1-7	KN1-9
น้ำดิน	100	97	95	93	91
น้ำยางคอมปาวด์	0	3	5	7	9

โดยในการผสมจะนำน้ำยางคอมปาวด์เทลงในน้ำดิน ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยกวนส่วนผสมอย่างช้าๆ นานประมาณ 10 นาที ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อตัน (การทดสอบความทนแรงดัดและการทดสอบความแข็งแรงใช้ชิ้นทดสอบเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 12 เซนติเมตร และ สำหรับการทดสอบความทนต่อการขีดสีใช้ชิ้นทดสอบขนาด 10 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร ความหนาไม่ต่ำกว่า 1 เซนติเมตร) ที่ขึ้นงานทดสอบในแม่พิมพ์ 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำชิ้นงานทดสอบออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นรอชิ้นงานแห้งตามธรรมชาติประมาณ 1 สัปดาห์ แล้วนำชิ้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

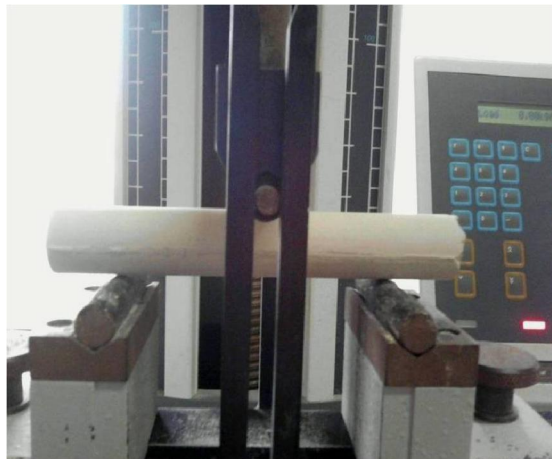
2.1 การทดสอบความทนแรงดัด

นำชิ้นงานทดสอบอ้างอิงสูตร PAA (เฟาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส) และชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3 KN1-5 KN1-7 และ KN1-9 ซึ่งผ่านการอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง ไปทดสอบความทนแรงดัด (Flexural strength) โดยใช้เครื่องทดสอบการรับแรงแบบ 3 จุด ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LRX 5K ขนาดน้ำหนักกด 5 กิโลนิวตัน

การจัดวางชิ้นงานทดสอบ สำหรับการทดสอบความทนแรงดัด แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งได้มีการบันทึกค่าน้ำหนักกด เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบที่หัก และคำนวณค่าความทนแรงดัด โดยใช้สมการ (4.1)

$$\sigma = \frac{8FL}{\pi d^3} \quad (4.1)$$

โดยที่ F	คือ	น้ำหนักกด (กิโลกรัม)
L	คือ	ระยะห่างระหว่างจุดรองรับชิ้นทดสอบ (เซนติเมตร)
d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ (เซนติเมตร)



รูปที่ 4.1 การทดสอบความทนแรงดัดด้วยเทคนิคแรงกระทำ 3 จุด
(ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ เท่ากับ 8 เซนติเมตร)

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติการแจกแจงแบบไวบูลล์ตามสมการที่ (4.2) เพื่อประเมินความทนแรงดัดที่โอกาสการแตกหักเป็นร้อยละ 63

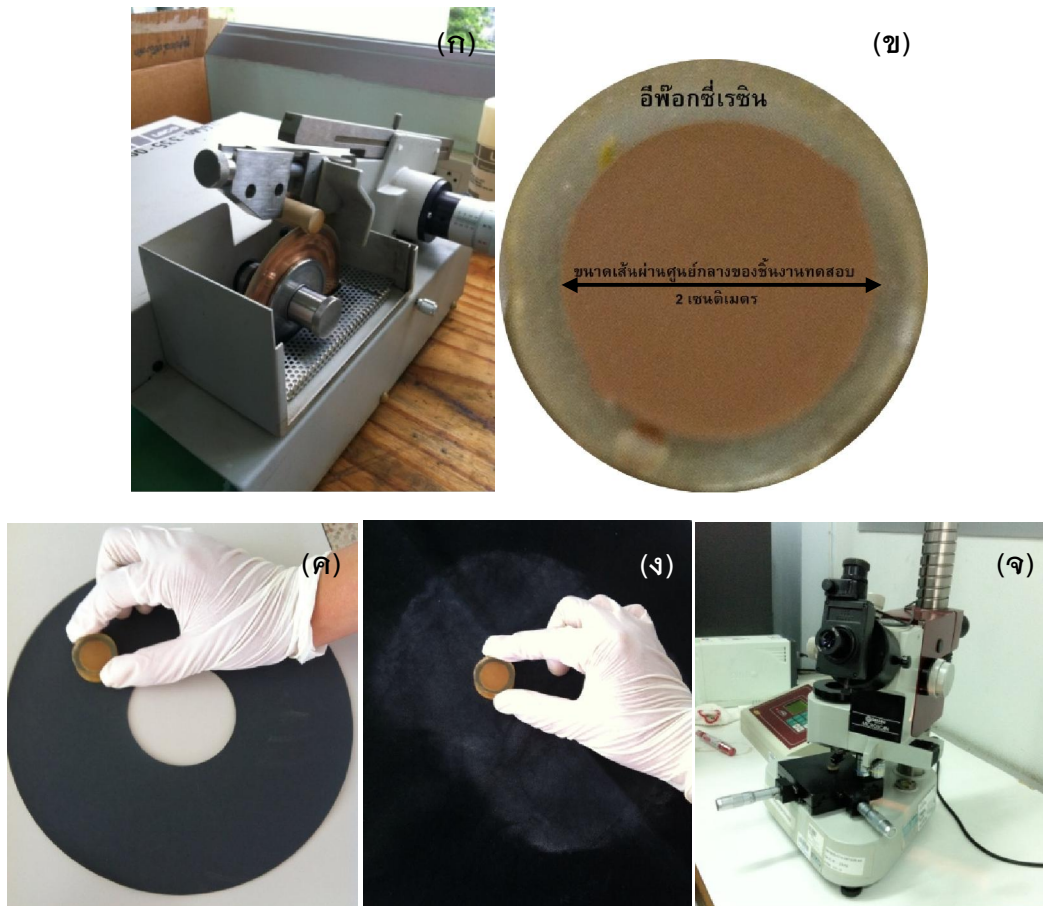
$$F=1-\exp \left[-V \left(\frac{\sigma - \sigma_v}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (4.2)$$

โดยที่ F	คือ	โอกาสการแตกหัก
V	คือ	ปริมาตรของชิ้นงานส่วนที่รับความเค้น (สมมติ $V = 1$)
σ	คือ	ค่าความทนแรงดัด ซึ่งเป็น ความเครียดที่เกิดความล้า
σ_v	คือ	ค่าความทนแรงดัดซึ่งโอกาสการแตกหักเท่ากับศูนย์ (ส่วนใหญ่ให้ $\sigma_0 = 0$)
m	คือ	ค่าคงที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูล (Weibull modulus)
σ_0	คือ	ค่าความทนแรงดัด (Characteristic strength) ที่ซึ่งโอกาสของการแตกหักเป็นร้อยละ 63 หรือ F เท่ากับ 0.63

ผลการทดสอบแสดงเป็นตารางข้อมูลการทดสอบความทนแรงดัด น้ำหนักกดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และตารางการจัดลำดับใหม่ (i) เพื่อคำนวณเป็นค่าความทนแรงดัดที่ซึ่งโอกาสการแตกหักเป็นร้อยละ 63 โดยนำเสนอเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความทนแรงดัด และ โอกาสการแตกหัก

2.2 การทดสอบความแข็งโดยใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ส

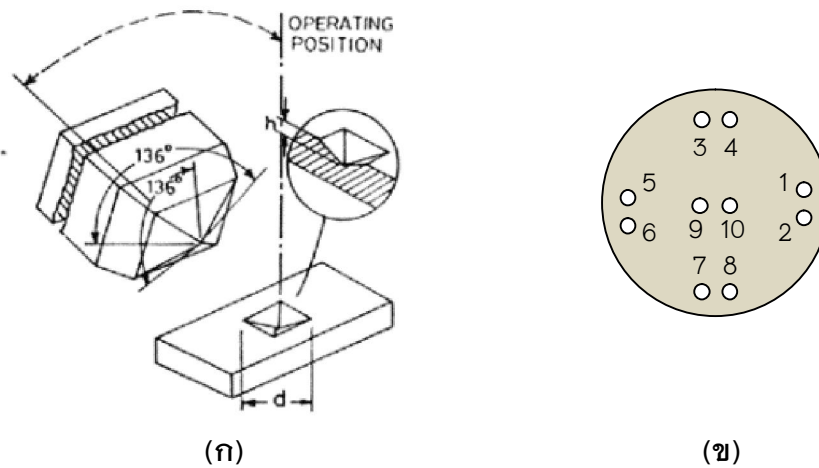
การเตรียมชิ้นงานทดสอบทำโดยตัดชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องตัดชิ้นงาน (รูปที่ 4.2(ก)) จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบที่ตัดที่มีขนาดความหนาประมาณ 7 มิลลิเมตร ทำการหุ้มด้วยอีพ็อกซีเรซิน (รูปที่ 4.2(ข)) จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 800 และ 1200 ตามลำดับ (รูปที่ 4.2(ค)) และขัดด้วยผงอลูมินาที่มีความละเอียด 0.1 ไมครอน อีกครั้ง (รูปที่ 4.2(ง)) จากนั้นจึงนำชิ้นงานทดสอบไปเคลือบด้วยทองคำให้มีความหนา 20 ถึง 30 นาโนเมตร



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อทดสอบความแข็ง

- (ก) การตัดชิ้นงาน
- (ข) หุ้มชิ้นงานด้วยอีพ็อกซีเรซิน
- (ค) การขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทราย
- (ง) การขัดชิ้นงานด้วยผงอลูมินา
- (จ) การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งของวัสดุ

การทดสอบความแข็ง ใช้เครื่องวัดความแข็งของวัสดุ หัวกดแบบวิกเกอร์สซึ่งเป็นหัวกดจัตุรัสที่ทำจากเพชร มุมระหว่างหน้าปรีamidด้านที่ตรงกันข้ามกัน จะเท่ากันและเท่ากับ 136 องศา ทำการกดบนผิวหน้าชิ้นงานทดสอบตามตำแหน่งต่างๆ 10 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข)



รูปที่ 4.3 การทดสอบความแข็ง (ก) หัวกดแบบวิกเกอร์ส และ (ข) ตำแหน่งทดสอบบนหน้าตัดชิ้นงาน

การทดสอบใช้น้ำหนักกด 5 ระดับ คือ 0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 5 kgf ตรวจสอบลักษณะรอยกดของชิ้นงานโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ทางแสงชนิดแสงสะท้อน และวัดขนาดของเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส คำนวณค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สตามสมการ (4.4)

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (4.3)$$

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (4.4)$$

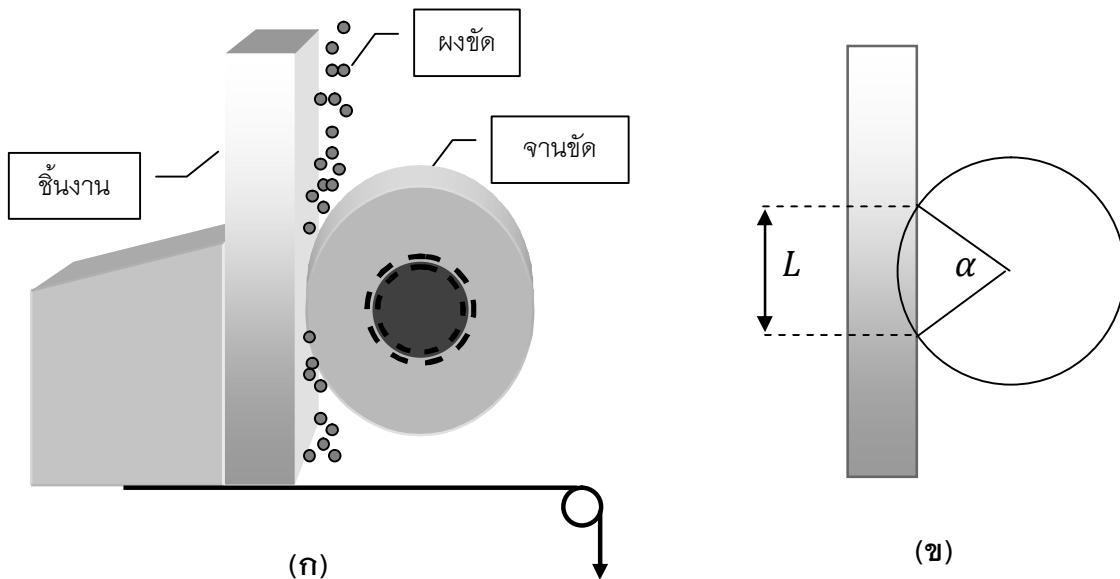
โดยที่ P คือ น้ำหนักกดที่ใช้กด (kgf)

d คือ ขนาดเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (มิลลิเมตร)

2.3 การทดสอบเพื่อประเมินความทนต่อการขัดสี

การประเมินความทนต่อการขัดสีสำหรับตัวอย่างที่เตรียม ใช้วิธีการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องเซรามิก มอก.2398 เล่ม 6-2553 ซึ่งเป็นวิธีทดสอบความทนการขัดถูสำหรับกระเบื้องชนิดไม่เคลือบ โดยการวัดความยาวของรอยลึก L ที่เกิดจากการขัดถูของจานขัดบนผิวหน้าชิ้นทดสอบ ภายใต้สภาวะและวัสดุขัดถูที่กำหนด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การขัดทำโดยบดผงขัดสี (Abrasive material) กับผิวหน้าชิ้นทดสอบด้วยจานหมุน (Rotating disc) ซึ่งทำจากวัสดุ ชนิด E 235A (Fe 360 A) (ตามมาตรฐาน ISO 630-1) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ± 0.2 มิลลิเมตร หนา 10 ± 0.1 มิลลิเมตร และหมุนด้วยความเร็ว 75 รอบต่อนาที ลักษณะการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4(ก)



รูปที่ 4.4 การทดสอบเพื่อประเมินความทนต่อการขัดสี

(ก) ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบ

(ข) การวัดความยาวของรอยลึก L และมุม α

การทดสอบ ใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์เป็นผงขัดสี ขนาด F80 (ตามมาตรฐาน ISO 8486-1) โดยป้อนผงขัดเข้าสู่บริเวณที่มีการขัดด้วยอัตราเร็ว 100 ± 10 กรัม ต่อ การหมุนของจานขัด 100 รอบ เมื่อหมุนจานขัดครบ 150 รอบ จึงวัดความยาวของรอยลึก (L) บนผิวหน้าชิ้นทดสอบ เพื่อคำนวณค่าปริมาตรที่หายไป (V) โดยใช้สูตร

$$V = \left(\frac{\pi\alpha}{180} - \sin\alpha \right) \frac{hd^2}{8}$$

โดยที่ $\sin(0.5\alpha) = \frac{L}{d}$

เมื่อ	α	คือ	มุมที่วัดได้จากจุดศูนย์กลางของจานขัดทำมุมกับรอยลึก (องศา)
	h	คือ	ความหนาของจานขัด (มิลลิเมตร)
	d	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานขัด (มิลลิเมตร)
	L	คือ	ความยาวของรอยลึก (มิลลิเมตร)

ความสัมพันธ์ของความยาวรอยลึก L และปริมาตรที่ถูกขุดออก V ที่คำนวณแล้วแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความยาวรอยลึก L และปริมาตรของตัวอย่างชิ้นงานที่ถูกขุดออก V

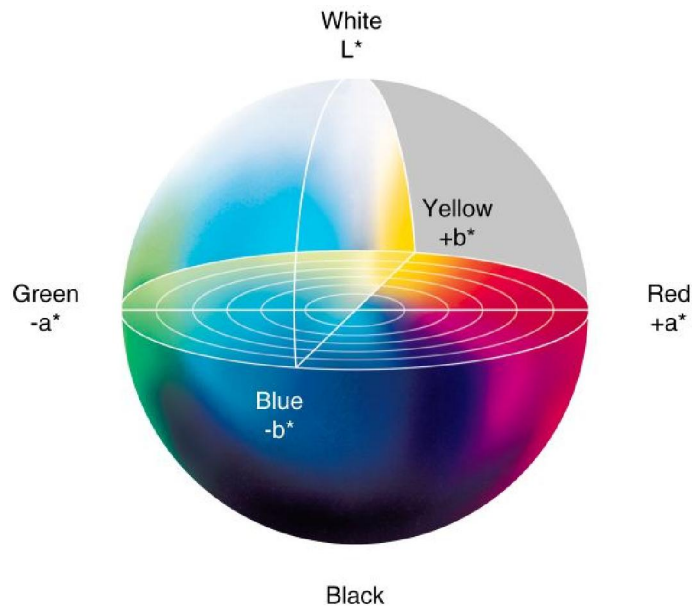
L mm	V mm ³	L mm	V mm ³	L mm	V mm ³	L mm	V mm ³	L mm	V mm ³
20	67	30	227	40	540	50	1062	60	1851
20.5	72	30.5	238	40.5	561	50.5	1094	60.5	1899
21	77	31	250	41	582	51	1128	61	1947
21.5	83	31.5	262	41.5	603	51.5	1162	61.5	1996
22	89	32	275	42	626	52	1196	62	2046
22.5	95	32.5	288	42.5	649	52.5	1232	62.5	2097
23	102	33	302	43	672	53	1268	63	2149
23.5	109	33.5	316	43.5	696	53.5	1305	63.5	2202
24	116	34	330	44	720	54	1342	64	2256
24.5	123	34.5	345	44.5	746	54.5	1380	64.5	2310
25	131	35	361	45	771	55	1419	65	2365
25.5	139	35.5	376	45.5	798	55.5	1459	65.5	2422
26	147	36	393	46	824	56	1499	66	2479
26.5	156	36.5	409	46.5	852	56.5	1541	66.5	2537
27	165	37	427	47	880	57	1583	67	2596
27.5	174	37.5	444	47.5	909	57.5	1625	67.5	2656
28	184	38	462	48	938	58	1689	68	2717
28.5	194	38.5	481	48.5	968	58.5	1713	68.5	2779
29	205	39	500	49	999	59	1758	69	2842
29.5	215	39.5	520	49.5	1030	59.5	1804	69.5	2906

ตอนที่ 2 ปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ด้วยการเติมสารที่ทำให้เกิดสี

ศึกษาลักษณะสีปรากฏของยางคอมปาวด์เมื่อใช้ 50% ดิสเพอร์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์ และ สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบได้กำหนดใช้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำดินจากดินผสมสำเร็จรูป และ น้ำยางคอมปาวด์ สูตร KN1-9 โดยมีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตั้งแต่ 0 – 50 phr และใช้สีธรรมชาติสีแดง ระหว่าง 0 – 10 phr

วัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดสี (Hunter Lab, รุ่น Miniscan XE Plus) ใช้ระบบสี CIE Lab วัดค่า L^* a^* และ b^* โดยที่ L^* หมายถึง ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำหรือสีมืดที่สุด) จนถึง 100 (ขาวหรือสว่าง)

ที่สุด) $+a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง และ $-a^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเขียว $+b^*$ หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง และ $-b^*$ หมายถึงค่าความเป็นสีน้ำเงิน ตามที่แสดงภาพในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 CIE Lab color space

แต่ละสูตรทำสามซ้ำ แสดงผลการทดสอบเปรียบเทียบเป็นค่าดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI) ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (4.5)

$$WI = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (4.5)$$

และค่าความแตกต่างของสี (ΔE) คำนวณได้จากสมการที่ (4.6)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (4.6)$$

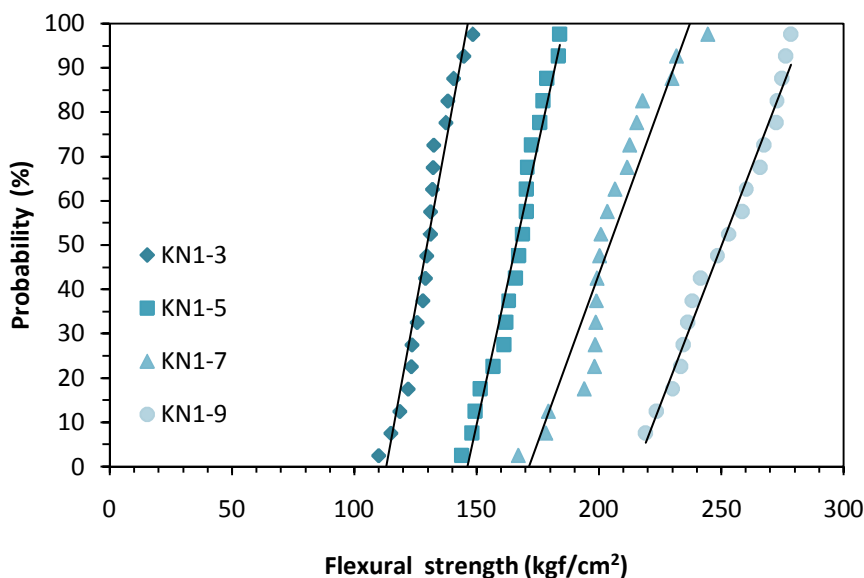
5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดสอบความทนแรงดัด

จากการนำชิ้นงานทดสอบ PAA เหนือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3 KN1-5 KN1-7 และ KN1-9 ตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ไปทดสอบความทนแรงดัด โดยใช้จำนวนชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 20 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทำสถิติการแจกแจงข้อมูลแบบไวบูลส์

ผลการทดสอบความทนแรงดัด โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำสามจุด ได้ข้อมูลดังต่อไปนี้ คือ ผลของน้ำหนัก และ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานบริเวณที่แตกหัก เพื่อดำเนินการหาค่าความทนแรงดัดของชิ้นงานทดสอบโดยใช้สมการที่ (4.1) ซึ่งได้สรุปข้อมูลแสดงในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1 ถึง ก.5)

เมื่อทำการหาคำนวณหาค่าความทนแรงดัดของชิ้นงานในแต่ละสูตรแล้ว ต่อมาเป็นการจัดเรียงลำดับข้อมูลใหม่ของค่าความทนแรงดัดน้อยสุดไปหาค่าความทนแรงดัดมากที่สุด ลำดับที่ $i=1$ จนถึง $i=20$ หาคำนวณค่าโอกาสการแตกหัก หาคำนวณค่า $\ln \ln\left(\frac{1}{1-F}\right)$ และ $\ln \sigma$ ซึ่งได้สรุปข้อมูลแสดงในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.6 ถึง ก.10) จากนั้นนำข้อมูลเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดัดและ โอกาสการแตกหัก ซึ่งแสดงสรุปในรูปแบบที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดัด และ โอกาสการแตกหัก

สำหรับชิ้นงานทดสอบจากดินผสมสำเร็จรูป PAA เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความทนแรงดัด (σ_0) 76 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบกับชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3 KN1-5 KN1-7 และ KN1-9 ตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความทนแรงดัด (σ_0) 134 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความทนแรงดัด (σ_0) 171 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-7 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความทนแรงดัด (σ_0) 213 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าความทนแรงดัด (σ_0) 259 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ผลการทดลองยืนยันชัดเจน 2 ประเด็น คือ ชิ้นงานทดสอบที่มีการใช้น้ำยางคอมปาวด์ในส่วนผสมแสดงความทนแรงดัดมากกว่าชิ้นงานที่เตรียมจากดินและผ่านการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการเผาดิบ (Biscuit firing) เพื่อไล่สารอินทรีย์และทำให้ผงดินเกาะตัวกันมากขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่ม แต่ยังคงมีช่องว่างรูพรุนระหว่างอนุภาคดิน นอกจากนี้การใช้น้ำยางคอมปาวด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นยังผลให้ชิ้นงานทดสอบมีความทนแรงดัดสูงขึ้น

5.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงโดยใช้หัวกดแบบวิกเกอร์ส

ผลการทดสอบความแข็งแรงด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงของวัสดุ โดยการวัดขนาดของเส้นทแยงมุมของรอยกดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และค่าน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบ แสดงในภาคผนวก ข เมื่อคำนวณค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส ตามสมการ (4.4) ผลการคำนวณค่าความแข็งแรงแต่ละตำแหน่งทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.1 - 5.4

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์สของชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3
อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

น้ำหนักกด (kgf)	ตำแหน่งที่ทดสอบ										HV เฉลี่ย (MPa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.1	10	7	3	7	8	8	7	8	7	8	7 ± 2
0.2	16	19	8	10	9	7	5	5	4	7	9 ± 5
0.5	8	6	17	22	6	6	9	8	11	13	11 ± 5
1	6	5	14	16	8	16	9	14	53	47	19 ± 12
5	25	22	52	44	30	33	39	26	55	53	38 ± 6

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์สของชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-5
อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

น้ำหนักกด (kgf)	ตำแหน่งที่ทดสอบ										HV เฉลี่ย (MPa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.1	19	9	3	6	7	8	20	14	11	14	11 ± 5
0.2	5	6	7	8	11	10	4	6	18	10	9 ± 4
0.5	37	14	35	10	9	8	11	9	8	8	15 ± 11
1	9	19	13	25	17	15	51	53	19	18	24 ± 15
5	33	34	44	25	28	26	52	48	41	43	37 ± 10

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์สของชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-7

อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

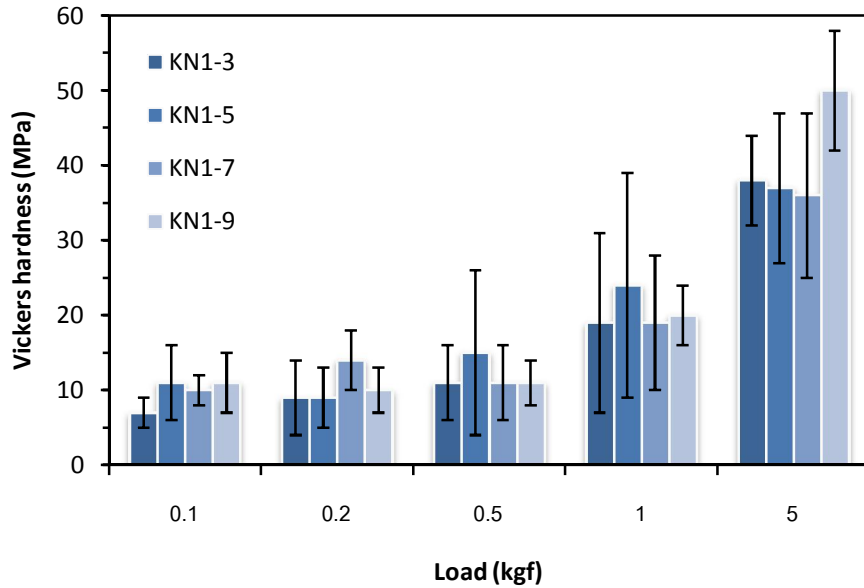
น้ำหนักกด (kgf)	ตำแหน่งที่ทดสอบ										HV เฉลี่ย (MPa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.1	13	9	7	9	9	11	11	10	11	11	10 ± 2
0.2	14	11	21	10	13	10	18	10	13	15	14 ± 4
0.5	7	8	14	9	9	9	22	16	10	9	11 ± 5
1	25	19	9	9	18	29	11	12	18	36	19 ± 9
5	19	26	27	32	40	37	35	42	48	57	36 ± 11

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงแบบวิกเกอร์สของชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-9

อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

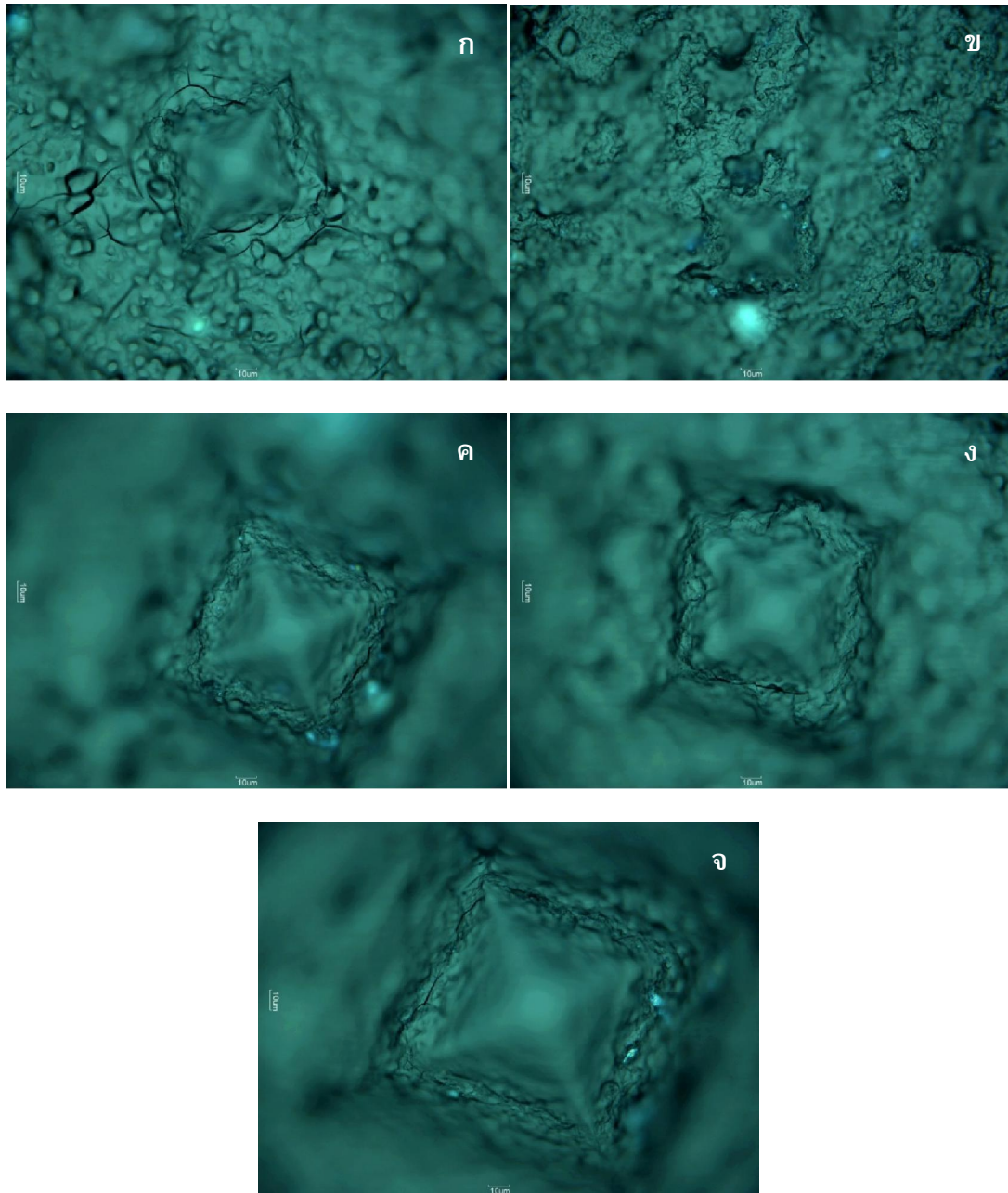
น้ำหนักกด (kgf)	ตำแหน่งที่ทดสอบ										HV เฉลี่ย (MPa)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.1	22	17	10	9	10	9	9	9	7	8	11 ± 4
0.2	12	13	11	13	11	9	7	7	4	3	10 ± 3
0.5	15	14	12	12	10	11	11	10	8	6	11 ± 3
1	30	25	26	23	21	20	14	15	15	14	20 ± 4
5	80	64	70	58	52	43	37	37	34	28	50 ± 8

จากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ส และ น้ำหนักกดที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ประกอบกับผลการตรวจสอบลักษณะรอยกดของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางแสงชนิดแสงสะท้อน แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 5.3 และ 5.4 พบว่า เมื่อใช้น้ำหนักกดที่มากขึ้นตั้งแต่ 1 kgf ขึ้นไป ลักษณะขอบรอยกดจะไม่คมชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวของชิ้นงานทดสอบ และ ชิ้นงานทดสอบมีความแข็งต่ำมาก จึงคาดว่า น้ำหนักกดที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.5 kgf เนื่องจากเป็นช่วงน้ำหนักกดที่ให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักกด

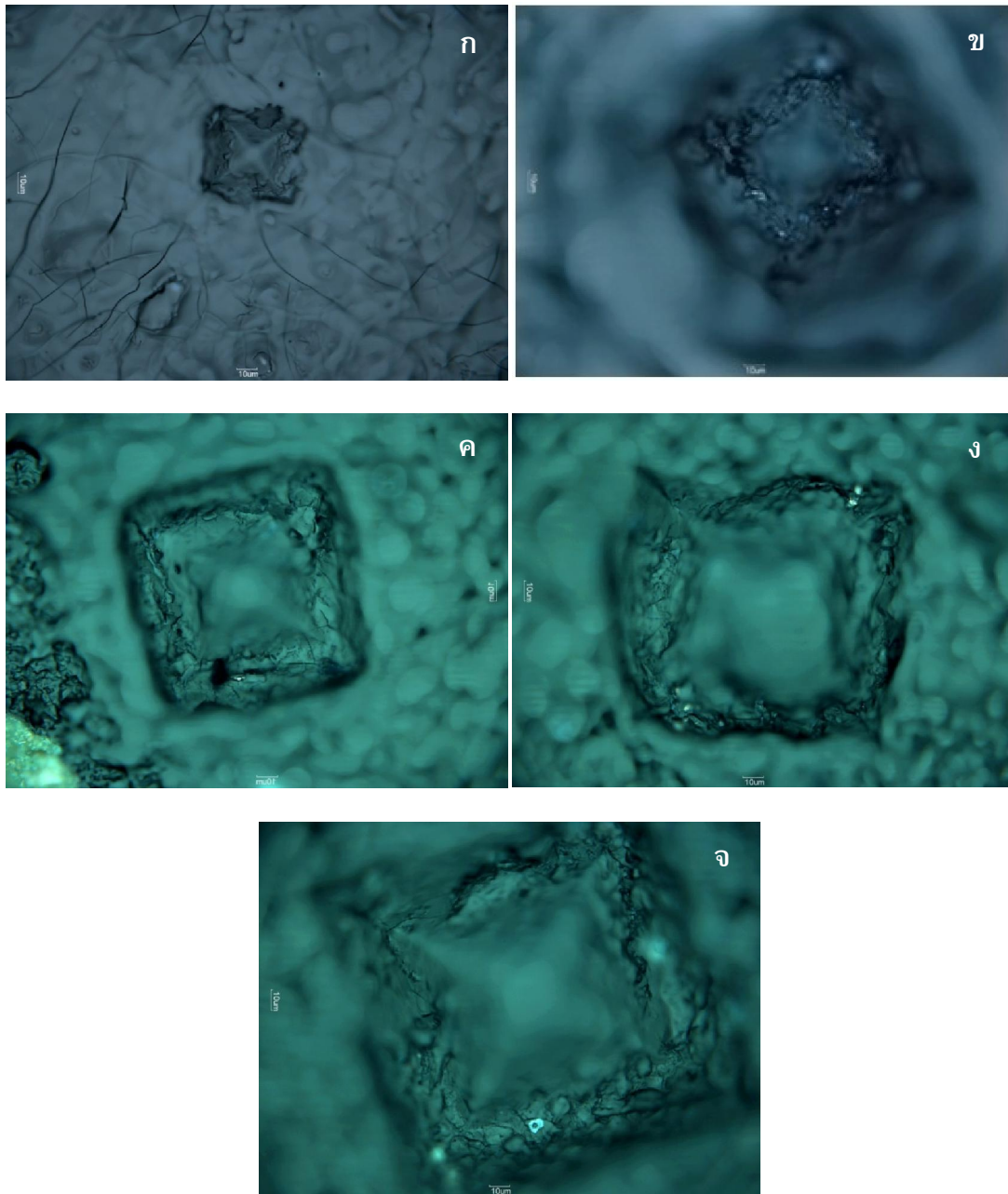


รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดและความแข็งแบบวิกเกอร์ส

เนื่องจากน้ำหนักกดที่เหมาะสมในช่วง 0.1 ถึง 0.5 kgf จึงได้เลือกพิจารณาผลการทดสอบที่ใช้ น้ำหนักกด 0.5 kgf ซึ่งจากตาราง 5.1 – ตาราง 5.4 พบว่า ความแข็งแบบวิกเกอร์สของชิ้นงานทดสอบ สูตร KN1-3 KN1-5 KN1-7 และ KN1-9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่า เท่ากับ 11 ± 5 , 15 ± 11 , 11 ± 5 และ 11 ± 3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดสอบความ แข็งดังกล่าว สามารถยืนยันได้ว่าค่าความแข็งไม่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ผสมในชิ้นงาน ทดสอบ



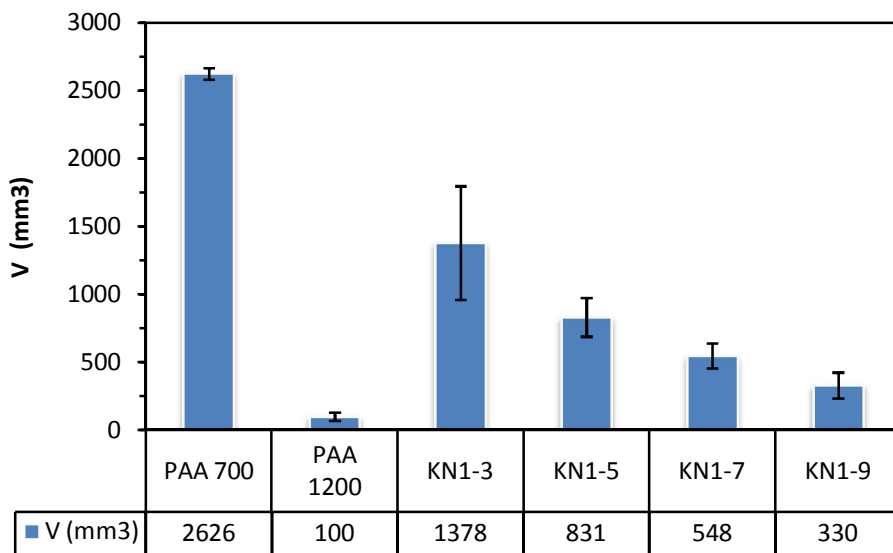
รูป 5.3 ลักษณะรอยกดของชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักกด (ก) 0.1 (ข) 0.2 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 kgf



รูป 5.4 ลักษณะรอยกัดของชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักกด (ก) 0.1 (ข) 0.2 (ค) 0.5 (ง) 1 และ (จ) 5 kgf

5.3 ผลการทดสอบเพื่อประเมินความทนต่อการขัดสี

จากการประเมินความทนต่อการขัดสีโดยการวัดความยาวรอยลึก สำหรับชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-3 KN1-5 KN1-7 และ KN1-9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ผลข้อมูลดังแสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.1) และสำหรับผลการประเมินความทนต่อการขัดสีของตัวอย่างเปรียบเทียบซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบ PAA เเผาที่อุณหภูมิ 700 และ 1200 องศาเซลเซียส แสดงในภาคผนวก ค (ตารางที่ ค.2) ทั้งนี้แสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกของแต่ละตัวอย่างในรูปที่ 5.5



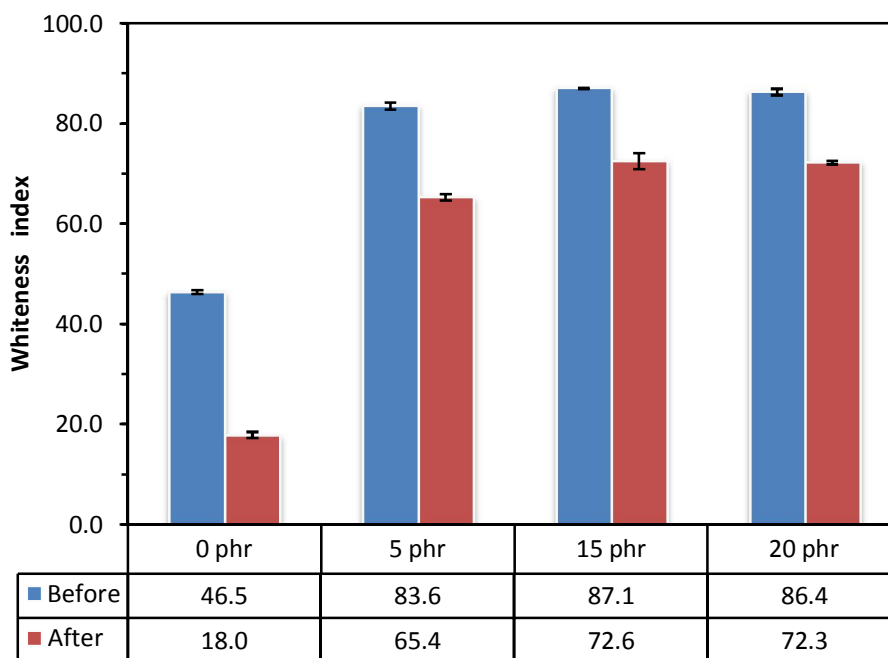
รูปที่ 5.5 ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกของแต่ละตัวอย่าง

จากรูปที่ 5.5 สำหรับตัวอย่างเปรียบเทียบ PAA เเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งการเผาที่ระดับอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการเผาดิบ (Biscuit firing) เพื่อไล่สารอินทรีย์และทำให้ผงดินเกาะตัวกันมากขึ้น มีความแข็งแรงเพิ่ม แต่ยังคงมีช่องว่างรูพรุนระหว่างอนุภาคดิน ทำให้ความต้านทานการขัดสีต่ำจึงมีปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกสูงสุด และสำหรับการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จะทำให้ผงดินหรือวัตถุดิบตั้งต้นเกิดการหลอมรวมกัน ปริมาณของรูพรุนต่างๆ ลดลง การใช้อุณหภูมิระดับ 1200 องศาเซลเซียส ดังกล่าวเป็นการเผาพูนึก (Sintering) ซึ่งทำให้ชิ้นงานสามารถต้านทานต่อการขัดสีได้ดีกว่า

สำหรับชิ้นงานทดสอบที่มีการใช้น้ำยางคอมปาวด์ อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลปรากฏแนวโน้มที่ชัดเจน คือปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมีค่าลดลงตามปริมาณการเติมน้ำยางคอมปาวด์ในชิ้นงานทดสอบ

5.4 ผลการทดสอบการปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ด้วยการเติมสารที่ทำให้เกิดสี

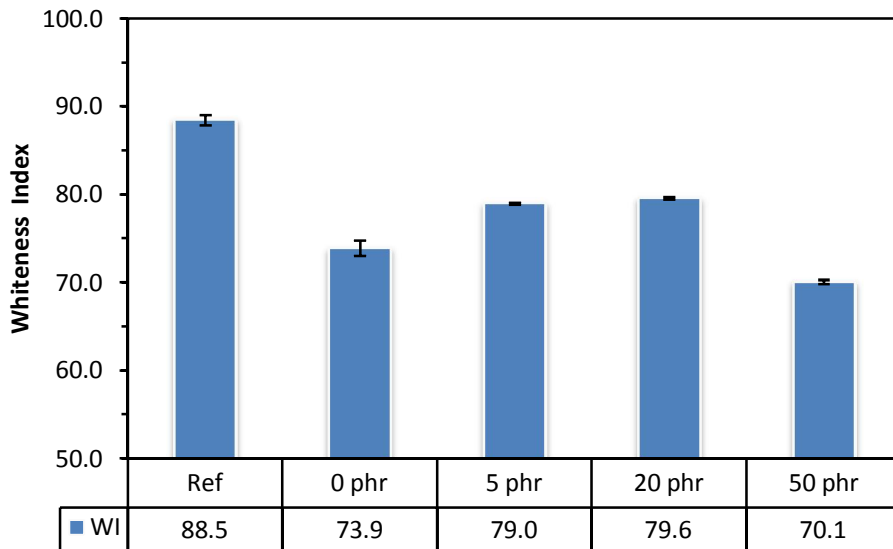
ผลการทดสอบความขาวซึ่งวัดเป็นค่า L^* a^* และ b^* ของแต่ละตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.1) โดยคำนวณเป็นค่าดัชนีความขาว (Whiteness Index, WI) ของตัวอย่างยางคอมปาวด์ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตั้งแต่ 0 – 20 phr ก่อนอบ และ หลังอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 5.6 ค่าดัชนีความขาวของตัวอย่างยางคอมปาวด์ก่อนอบสูงกว่ากรณีหลังอบทุกๆ สัดส่วน โดยพบว่าตัวอย่างยางคอมปาวด์ก่อนอบซึ่งเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 หรือ 15 หรือ 20 phr นั้นจะให้ค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 5.6 ดัชนีความขาวของตัวอย่างยางคอมปาวด์ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์

สำหรับตัวอย่างยางคอมปาวด์หลังอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้ค่าดัชนีความขาวลดลงอย่างชัดเจน โดยตัวอย่างยางคอมปาวด์หลังอบซึ่งเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 15 หรือ 20 phr แสดงค่าดัชนีความขาวใกล้เคียงกัน และค่าดัชนีความขาวสูงกว่าในกรณีที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 phr ไม่มากนัก ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมไม่เกิน 15 phr

ผลการทดสอบความขาวซึ่งวัดเป็นค่า L^* a^* และ b^* ของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตั้งแต่ 0 – 50 phr หลังอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงในภาคผนวก ง (ตารางที่ ง.2) และผลการคำนวณค่าดัชนีความขาว แสดงในรูปที่ 5.7 ทั้งนี้ใช้ตัวอย่างของดินที่ไม่เติมน้ำยางคอมปาวด์เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ (Ref) ดัชนีความขาว

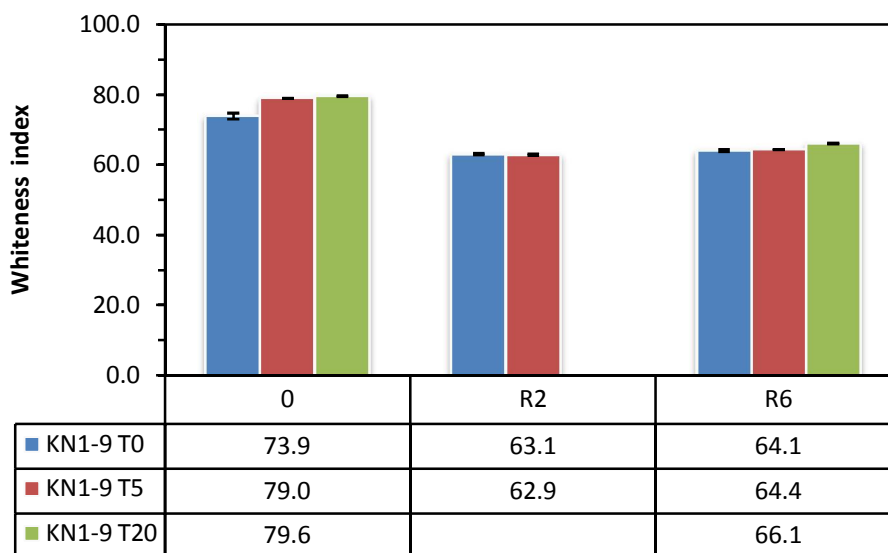


รูปที่ 5.6 ดัชนีความขาวของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 0 – 50 phr
(อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง)

ชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 0, 5, 20 และ 50 phr ให้ค่าดัชนีความขาวต่ำกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบ โดยมีค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ต่างจากตัวอย่างเปรียบเทียบเป็น 14.6, 9.5, 8.5 และ 18.6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 หรือ 20 phr มีความขาวและโทนสีใกล้เคียงกับตัวอย่างเปรียบเทียบมากกว่ากรณีของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่ไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ หรือ เติมไทเทเนียมไดออกไซด์มากเกินไป

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า $+b^*$ ที่บอกความเป็นสีเหลืองนั้น (ภาคผนวก ง ตาราง ง.2) ตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 หรือ 20 phr (KN1-9 T5 และ KN1-9 T20) แสดงค่า $+b^*$ ระหว่าง 13 – 14 ขณะที่ตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่ไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (KN1-9 T0) และที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 50 phr (KN1-9 T20) ให้ค่า $+b^*$ เป็น 16 –18 และ 22 – 23 ตามลำดับ ซึ่งยืนยันว่าการใช้ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์สูงถึง 50 phr ไม่ช่วยในการกลบโทนสีเหลืองที่เกิดจากยางใหม่ได้ในระดับดีเทียบเท่ากับกรณีที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 5 หรือ 20 phr

ผลการคำนวณค่าดัชนีความขาวของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 0, 5 และ 20 phr ร่วมกับการใช้สีธรรมชาติสีแดง 2 และ 6 phr หลังอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 5.7



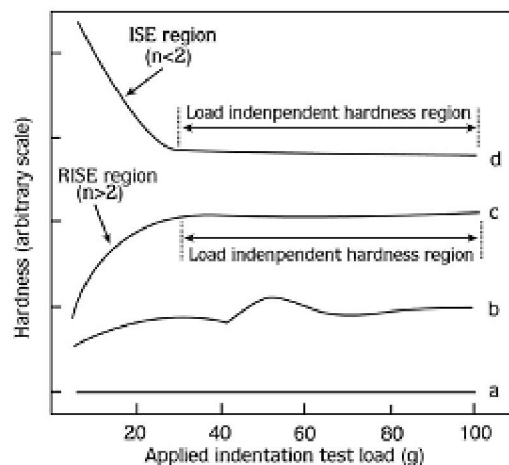
รูปที่ 5.7 ดัชนีความขาวของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์และสีแดง (อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง)

ตัวอย่างอ้างอิงสำหรับกรณีนี้คือ สูตร KN1-9T0 KN1-9T5 และ KN1-9T20 ซึ่งเป็นตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ 0, 5 และ 20 phr ตามลำดับ การเติมสีธรรมชาติสีแดงในปริมาณ 2 phr (ใช้รหัส R2) และ 6 phr (ใช้รหัส R6) ให้ค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันในแต่ละสูตร ซึ่งมีค่าดัชนีความขาวที่ต่ำกว่าตัวอย่างอ้างอิงทั้งสิ้น นอกจากนี้ค่า a^* ที่ชี้ถึงความเป็นสีแดง มีค่าระหว่าง 3 – 7 (ภาคผนวก ง ตาราง ง.3) สูงกว่าที่วัดได้ในตัวอย่างอ้างอิงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (a^* มีค่าระหว่าง 2 – 3) แต่ค่า b^* ที่บอกความเป็นสีเหลืองของตัวอย่างที่มีการเติมสีธรรมชาติสีแดงมีค่าระหว่าง 26 – 28 (ภาคผนวก ง ตาราง ง.3) ในขณะที่ค่า b^* ของตัวอย่างอ้างอิงมีค่าในช่วง 12 – 19 เท่านั้น ซึ่งหมายความว่า การใช้สีธรรมชาติสีแดงไม่ทำให้โทนสีแดงเด่น แต่กลับช่วยเสริมทำให้เกิดโทนสีเหลืองมากยิ่งขึ้น

6. วิจารณ์ผล

6.1 การประเมินความคงทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

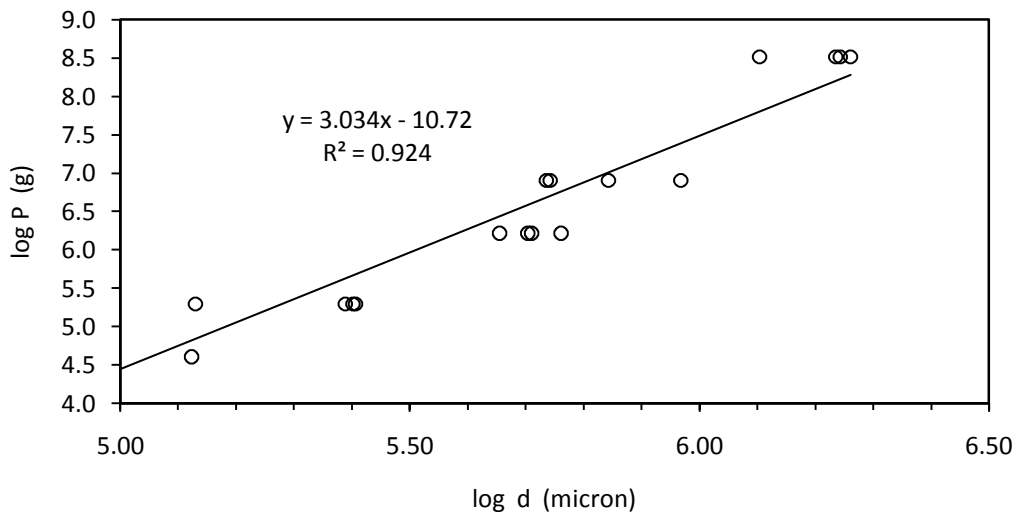
ความแข็งเป็นสมบัติที่อธิบายถึงความสามารถที่มีต่อแรงทางกลที่จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหรือขนาดอย่างถาวร (Plastic deformation) ในการทดสอบความแข็งการตอบสนองต่อแรงทางกลดังกล่าวสามารถจำแนกได้ 4 ลักษณะ [8, 9] คือ a) ค่าความแข็งคงที่ไม่แปรไปตามน้ำหนักกดที่ใช้ทดสอบ (Load-independent behavior) b) ค่าความแข็งไม่คงที่ c) ค่าความแข็งแปรผันตรงกับการเพิ่มน้ำหนักกด (Reverse indentation size effect หรือ RISE) และ d) ค่าความแข็งแปรผกผันกับการเพิ่มน้ำหนักกด (Indentation size effect หรือ ISE) ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดและค่าความแข็ง [9]

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบ (P) และขนาดของรอยกด (d) ตามสมการเมเยอร์ ($P = Ad^n$; เมื่อ n คือ Meyer index และ A คือค่าคงที่) ค่า Meyer index, สามารถใช้บ่งชี้ลักษณะการตอบสนองของวัสดุต่อแรงทางกลได้ สำหรับพฤติกรรมแบบ ISE จะมีค่า $n < 2$ แต่สำหรับพฤติกรรมแบบ RISE จะมีค่า $n > 2$ และสำหรับพฤติกรรมที่ความแข็งคงที่ไม่แปรไปตามน้ำหนักกดที่ใช้ทดสอบ (Load-independent behavior) จะมีค่า $n=2$

เมื่อนำข้อมูลจำนวน 20 ข้อมูล (สูตร KN1-3, KN1-5, KN1-7, KN1-9 ทดสอบโดยใช้น้ำหนักกด 5 ระดับ ตั้งแต่ 0.1 – 5 kgf) เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log P$ และ $\log d$ (รูปที่ 6.2) ได้ค่าความชันของกราฟ (n) มีค่าเท่ากับ 3.034 ซึ่ง Kumari P. *et al* [10] ได้อ้างอิงข้อมูลจากหนังสือเรื่อง Mikroskopia เขียนโดย Onitsch E.M. และข้อมูลจากหนังสือเรื่อง Metall เขียนโดย Hanneman M. ที่ให้ข้อมูลระหว่างค่า n และลักษณะเฉพาะของวัสดุไว้ว่า กรณี $n > 1.6$ วัสดุนั้นเป็นวัสดุนิ่มอ่อน (Soft) และกรณี $1 < n < 1.6$ วัสดุนั้นเป็นวัสดุแข็ง (Hard)



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์แบบ log-log ระหว่างน้ำหนักกดและขนาดรอยกดของชิ้นงานทุกสูตร

ดังนั้นสำหรับตัวอย่างที่เตรียมจากดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นวัสดุประเภทอ่อน (Soft) ที่มีการตอบสนองต่อแรงกดแบบ RISE ที่ค่าความแข็งแปรผันตรงกับการเพิ่มน้ำหนักกด และค่าความแข็งไม่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำยางคอมปาวด์

อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำยางคอมปาวด์กลับส่งผลต่อค่าความทนแรงดัดและความทนต่อการขัดสีอย่างชัดเจน โดยสำหรับประเด็นของความทนแรงดัดนั้น การใช้น้ำยางคอมปาวด์ผสมในดินทำให้ค่าดัดสูงกว่าการใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังเช่น ข้อมูลจากงานวิจัยของ Lee, K. C. *et al* [11] ซึ่งศึกษาสมบัติทางกายภาพของอิฐที่ทำจากวัสดุผสมระหว่างดินและพอลิเมอร์ หลายชนิด อาทิ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิไวนิลไพโรไลไดน และ คาร์บอกซิลเมททิลเซลลูโลส พบว่า วัสดุผสมระหว่างดินผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักดิน และไม่ผ่านการให้ความร้อนจะมีค่าการรับกำลังอัด และค่าความทนแรงดัดสูงที่สุด โดยมีค่าเป็น 16.57 เมกะปาสคาล (168.97 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และ 3.02 เมกะปาสคาล (30.79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่มีการผสมพอลิเมอร์เลยนั้นจะมีค่าการรับกำลังอัดเพียง 5.01 เมกะปาสคาล (51.09 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) และค่าความทนแรงดัดเป็น 1.3 เมกะปาสคาล (13.26 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) เท่านั้น

ดังนั้น การใช้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น ความทนแรงดัดและความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถใช้เป็นสมบัติชี้วัดศักยภาพการเป็นตัวเชื่อมประสานของน้ำยางคอมปาวด์ได้เหมาะสมมากกว่าสมบัติด้านความแข็ง นอกจากนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์

6.2 การปรับปรุงสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ด้วยการเติมสารที่ทำให้เกิดสี

จากการทดสอบความขาวซึ่งวัดเป็นค่า L^* a^* และ b^* ยืนยันว่า ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับระบบน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ 15 phr โดยสามารถพิจารณาจากค่าดัชนีความขาว ตามที่ระบุในกราฟรูปที่ 5.6 และค่าความสว่าง L^* (หลังอบ) ตามที่ระบุในตารางที่ ง.1 (ภาคผนวก ง) แต่เมื่อพิจารณาค่า b^* (หลังอบ) ตามที่ระบุในตารางที่ ง.1 จะพบว่า กรณีไม่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ $+b^*$ มีค่าระหว่าง 21 – 24 กรณีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 5 phr ตัวแปร $+b^*$ มีค่าระหว่าง 26 – 27 กรณีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 15 phr ตัวแปร $+b^*$ มีค่าระหว่าง 22 – 25 และกรณีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 20 phr ตัวแปร $+b^*$ มีค่าระหว่าง 22 – 23 ซึ่งแสดงว่า การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ไม่สามารถช่วยลดโทนสีเหลืองที่คาดว่าเกิดจากการไหม้ของยางเนื่องมาจากการอบที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงได้

สำหรับการทดสอบความขาวของชิ้นงานทดสอบดินผสมน้ำยางคอมปาวด์นั้น ดินที่ใช้ในการศึกษา¹ ให้ค่าดัชนีความขาวระดับ 88 – 89 ความสว่าง L^* ระดับ 90 – 92 ค่า $+b^*$ ที่บอกความเป็นสีเหลือง ระดับ 7 – 8 โดยเมื่อมีการผสมน้ำยางคอมปาวด์ (สูตร KN1-9) และผ่านการอบ ค่าดัชนีความขาวลดลงเป็น 73 – 74 ค่าความสว่าง L^* ลดลง เป็น 81 โดยประมาณ และค่า $+b^*$ เพิ่มขึ้นเป็น 16 – 18 (ตารางที่ ง.2) แสดงว่าสีของยางไหม้และอาจรวมถึงธาตุองค์ประกอบของดินที่ใช้ทดสอบส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ เมื่อมีการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ร่วมด้วย จะช่วยเพิ่มค่าดัชนีความขาวเป็น 78 – 79 ความสว่าง L^* เป็น 81 – 86 และลดค่า $+b^*$ เป็น 13 – 14 ยกเว้นกรณีใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 50 phr ที่กลับลดดัชนีความขาวเป็น 70 ค่าความสว่าง L^* เป็น 81 – 82 ทั้งยังเสริมค่า $+b^*$ ให้เป็นระดับ 22 – 23 จากข้อมูลดังที่กล่าวนั้น สรุปได้ว่า ปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสีที่เกิดจากการไหม้ของยางในผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ที่ศึกษานี้ คือ 15 phr

ในกรณีใช้สีธรรมชาติสีแดงร่วมด้วยนั้น การใช้สีธรรมชาติสีแดงปริมาณต่างๆ ส่งผลต่อค่าดัชนีความขาว ตลอดจนค่าความสว่าง L^* ค่าความเป็นสีแดง $+a^*$ และค่าความเป็นสีเหลือง $+b^*$ ไม่แตกต่างกัน กล่าวคือ การใช้สีธรรมชาติสีแดงทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ที่ศึกษานี้ มีดัชนีความขาวระดับ 63 – 66 ค่าความสว่าง L^* 75 – 79 ค่าความเป็นสีแดง $+a^*$ 3 – 7 และ ค่าความเป็นสีเหลือง $+b^*$ 26 – 28 ซึ่งหมายความว่า โทนสีเหลืองเด่นกว่าโทนสีแดง

¹ ผลวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF มีดังนี้ SiO_2 63.22%, Al_2O_3 26.81%, Fe_2O_3 0.33%, TiO_2 0.01% CaO 0.13%, MgO 0.12%, K_2O 3.38%, Na_2O 0.84% และ loss on ignition 5.17%

7. สรุปผล

ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นวัสดุอ่อน ค่าความแข็งแปรผันตรงกับการเพิ่มน้ำหนักกด (Reverse indentation size effect หรือ RISE) ค่าน้ำหนักกดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งสำหรับวัสดุนี้ คือ 0.5 kgf โดยมีค่าความแข็งเป็น 11 เมกะปาสคาลและไม่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ แต่การใช้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 9 ทำให้ความทนแรงดัดสูงขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 134 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็น 259 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณน้ำยางคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนต่อการขัดสีของผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ดียิ่งขึ้น โดยปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกลดลงจาก 1378 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เป็น 330 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังนั้นความทนแรงดัดและความทนต่อการขัดสีที่วัดจากการวัดความยาวรอยสึกจึงสามารถใช้เป็นสมบัติชี้วัดศักยภาพการเป็นตัวเชื่อมประสานของน้ำยางคอมปาวด์ได้เหมาะสมมากกว่าสมบัติด้านความแข็ง

การผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์ซึ่งผ่านการให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง มีค่าดัชนีความขาวเพิ่มขึ้น โดยปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมเป็น 15 phr แต่การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์นั้นไม่สามารถช่วยลดโทนสีเหลืองที่คาดว่าจะเกิดจากการไหม้ของยางเนื่องมาจากการอบที่ 150 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมงได้ นอกจากนี้การใช้สีธรรมชาติสีแดงปริมาณไม่เกิน 10 phr ทำให้ผลิตภัณฑ์ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์มีค่าดัชนีความขาวและค่าความสว่างต่ำลงและเพิ่มโทนสีเหลืองมากขึ้น ขณะที่โทนสีแดงไม่เด่นชัด

8. ข้อเสนอแนะ

ควรตรวจสอบผลของสีธรรมชาติสีแดงที่มีต่อสีของยางคอมปาวด์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] มิ่งสรรพ ขาวสะอาด และคณะ. 2545. **รายงานการศึกษาดัชนีสมบรูณ์ โครงการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมรายสาขา (สาขาเซรามิกและแก้ว).** สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2] นภัส จันทร์มี และฐิตินันท์ รัตนพรหม. 2555. **รายงานวิจัยฉบับสมบรูณ์ เรื่อง การใช้น้ำยางขึ้นเป็นตัวเชื่อมประสานสำหรับการผลิตภาชนะดินเผา.** (RDG5450045) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- [3] Kim, H. and Kim, T., **Measurement of hardness on traditional ceramics.** *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2002, 22, 1437– 1445.
- [4] Sidjanin, L., Rajnovic, D., Ranogajec, J. and Molnar, E., **Measurement of Vickers hardness on ceramics floor tiles.** *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2007, 27, 1767– 1773.
- [5] Gutierrez–Mora, F., Goretti, K. C. and Varela–Feria, F. M., **Indentation hardness of biomorphic SiC.** *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 2005, 23, 369 – 374.
- [6] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2550. **สารเคมียาง.** กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 150 หน้า
- [7] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2552. **ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). 200 หน้า
- [8] Sangwal, K. **On the reverse indentation size effect and microhardness measurement of solids.** *Mater Chem Phys.*, 2000, 63: 145 – 152.
- [9] Guder, H. S., Sahin, E., Sahin, O., Gocmez, H., Duran, C. and Ali Cetinkara, H. **Vickers and Knoop indentation microhardness study of β -SiAlON ceramic.** *Acta Phys Pol A.*, 2011, 120: 1026 – 1033.
- [10] Kumari, P., Kalainathan, S., Raj, N. **Vickers microhardness studies on cadmium mercury thiocyanate (CMTC) single crystals grown in silica gel.** *J. Mater. Lett.*, 2008, 62, 305–308.
- [11] Lee, K. C., Her, J. H. and Kwan, S. K. **Red clay composites reinforced with polymeric binders.** *Constr Build Mater.*, 2008, 22: 2292 – 2298.

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบความทนแรงดัด

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน
ทดสอบ PAA เพาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (kgf/cm ²)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	20.79	1.847	1.840	1.840	1.845	1.84	67.63
2	21.44	1.857	1.849	1.859	1.858	1.86	68.32
3	22.26	1.811	1.810	1.829	1.816	1.82	75.63
4	22.44	1.801	1.798	1.794	1.796	1.80	78.71
5	22.42	1.808	1.808	1.795	1.790	1.80	78.25
6	21.44	1.868	1.865	1.870	1.878	1.87	66.74
7	23.60	1.810	1.801	1.809	1.821	1.81	81.01
8	28.30	1.864	1.874	1.866	1.864	1.87	88.55
9	21.81	1.813	1.803	1.805	1.813	1.81	75.09
10	18.84	1.833	1.834	1.845	1.845	1.84	61.66
11	23.86	1.809	1.832	1.809	1.813	1.82	81.16
12	22.62	1.793	1.792	1.792	1.792	1.79	80.01
13	21.95	1.849	1.822	1.840	1.842	1.84	71.96
14	22.40	1.824	1.852	1.846	1.840	1.84	73.16
15	21.91	1.838	1.822	1.831	1.817	1.83	73.16
16	19.31	1.802	1.839	1.810	1.852	1.83	64.61
17	19.76	1.841	1.853	1.834	1.824	1.84	64.80
18	17.31	1.816	1.818	1.811	1.819	1.82	58.86
19	20.30	1.848	1.843	1.842	1.852	1.85	65.69
20	22.85	1.822	1.834	1.827	1.828	1.83	76.21

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน
ทดสอบสูตร KN1-3 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (kgf/cm ²)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	37.60	1.861	1.887	1.887	1.890	1.88	115.00
2	42.79	1.888	1.895	1.877	1.887	1.89	129.73
3	40.79	1.875	1.875	1.874	1.880	1.88	125.81
4	36.93	1.859	1.852	1.863	1.827	1.85	118.73
5	42.15	1.875	1.860	1.875	1.870	1.87	131.26
6	41.52	1.853	1.857	1.865	1.907	1.87	129.19
7	42.66	1.899	1.894	1.809	1.888	1.87	132.32
8	39.55	1.885	1.882	1.859	1.875	1.88	122.13
9	41.48	1.861	1.861	1.854	1.852	1.86	131.90
10	36.44	1.887	1.889	1.892	1.889	1.89	110.04
11	46.16	1.870	1.899	1.899	1.869	1.88	140.51
12	41.30	1.849	1.857	1.855	1.846	1.85	132.45
13	41.20	1.905	1.891	1.888	1.888	1.89	123.68
14	40.38	1.848	1.854	1.833	1.840	1.84	131.19
15	40.14	1.853	1.864	1.855	1.850	1.86	127.95
16	48.28	1.885	1.883	1.900	1.905	1.89	144.88
17	42.11	1.911	1.899	1.903	1.923	1.91	123.26
18	44.80	1.868	1.858	1.886	1.907	1.88	137.35
19	45.33	1.847	1.840	1.857	1.813	1.84	148.36
20	46.96	1.901	1.897	1.908	1.917	1.91	138.16

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน
ทดสอบสูตร KN1-5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (kgf/cm ²)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	56.84	1.851	1.840	1.850	1.848	1.85	183.63
2	52.31	1.861	1.841	1.869	1.863	1.86	165.94
3	51.82	1.896	1.873	1.851	1.850	1.87	162.02
4	48.65	1.854	1.846	1.830	1.863	1.85	156.91
5	54.16	1.870	1.879	1.873	1.878	1.88	167.31
6	52.59	1.860	1.836	1.841	1.842	1.84	170.59
7	58.63	1.862	1.870	1.865	1.862	1.86	184.13
8	48.89	1.834	1.842	1.833	1.829	1.83	161.26
9	53.32	1.856	1.857	1.863	1.840	1.85	170.38
10	46.06	1.871	1.849	1.835	1.845	1.85	148.14
11	54.18	1.860	1.858	1.857	1.879	1.86	170.49
12	50.48	1.846	1.856	1.841	1.847	1.85	163.01
13	56.17	1.903	1.852	1.865	1.845	1.87	175.97
14	47.63	1.857	1.852	1.853	1.863	1.86	151.64
15	50.64	1.902	1.909	1.902	1.900	1.90	149.58
16	55.34	1.846	1.841	1.845	1.855	1.85	178.92
17	53.24	1.847	1.840	1.860	1.840	1.85	172.13
18	55.50	1.836	1.845	1.868	1.868	1.85	177.27
19	47.83	1.893	1.898	1.893	1.881	1.89	143.98
20	54.34	1.882	1.857	1.881	1.866	1.87	168.81

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน
ทดสอบสูตร KN1-7 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (kgf/cm ²)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	68.46	1.826	1.813	1.831	1.826	1.82	229.73
2	52.92	1.831	1.815	1.809	1.831	1.82	178.31
3	58.13	1.822	1.802	1.804	1.816	1.81	199.30
4	53.30	1.820	1.815	1.831	1.823	1.82	179.37
5	62.30	1.807	1.803	1.801	1.811	1.81	215.55
6	60.61	1.833	1.831	1.844	1.848	1.84	198.45
7	64.66	1.851	1.852	1.865	1.888	1.86	203.31
8	52.19	1.831	1.843	1.856	1.881	1.85	167.11
9	56.86	1.810	1.819	1.814	1.813	1.81	193.98
10	58.43	1.820	1.810	1.803	1.815	1.82	199.00
11	58.57	1.810	1.818	1.818	1.831	1.82	198.09
12	61.73	1.793	1.822	1.817	1.802	1.81	212.52
13	62.05	1.839	1.834	1.813	1.831	1.83	206.43
14	67.67	1.800	1.828	1.817	1.803	1.81	231.62
15	61.44	1.831	1.856	1.839	1.842	1.84	200.19
16	71.76	1.809	1.809	1.806	1.836	1.82	244.40
17	67.00	1.842	1.853	1.839	1.841	1.84	217.68
18	62.64	1.843	1.852	1.849	1.863	1.85	200.89
19	63.27	1.865	1.861	1.868	1.865	1.86	196.70
20	66.45	1.852	1.861	1.856	1.857	1.86	211.48

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความทนแรงดัดแสดงน้ำหนักกดและเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงาน
ทดสอบสูตร KN1-9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	น้ำหนักกด (kg)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (cm)					ความทนแรงดัด (kgf/cm ²)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย	
1	66.57	1.791	1.796	1.797	1.795	1.79	234.49
2	70.21	1.832	1.830	1.828	1.827	1.83	233.58
3	71.98	1.831	1.843	1.838	1.837	1.84	236.35
4	74.52	1.867	1.865	1.846	1.837	1.85	238.22
5	66.71	1.808	1.807	1.810	1.806	1.81	229.95
6	80.85	1.799	1.807	1.815	1.812	1.81	278.46
7	66.83	1.779	1.776	1.778	1.783	1.78	241.71
8	68.99	1.840	1.852	1.840	1.849	1.85	223.60
9	81.40	1.814	1.809	1.823	1.821	1.82	276.44
10	78.04	1.798	1.806	1.796	1.799	1.80	272.61
11	83.58	1.880	1.843	1.850	1.853	1.86	265.99
12	38.96	1.853	1.845	1.854	1.863	1.85	124.54
13	82.05	1.812	1.844	1.833	1.812	1.83	274.77
14	81.05	1.844	1.859	1.855	1.848	1.85	260.04
15	75.24	1.833	1.829	1.833	1.842	1.83	248.27
16	69.23	1.865	1.864	1.854	1.858	1.86	219.00
17	85.04	1.843	1.841	1.866	1.859	1.85	272.51
18	75.74	1.804	1.834	1.811	1.804	1.81	258.71
19	85.33	1.870	1.854	1.864	1.875	1.87	267.54
20	73.85	1.815	1.813	1.805	1.811	1.81	253.19

ตารางที่ ก.6 การจัดลำดับใหม่ (i) สำหรับชั้นงานทดสอบ PAA เพาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ชั้นงาน	i	F	$1 - F$	$1/1 - F$	$\ln(1/1 - F)$	$\ln \ln (1/1 - F)$	σ	$\ln \sigma$
18	1	0.03	0.98	1.03	0.03	-3.68	58.86	4.08
10	2	0.08	0.93	1.08	0.08	-2.55	61.66	4.12
16	3	0.13	0.88	1.14	0.13	-2.01	64.61	4.17
17	4	0.18	0.83	1.21	0.19	-1.65	64.80	4.17
19	5	0.23	0.78	1.29	0.25	-1.37	65.69	4.18
6	6	0.28	0.73	1.38	0.32	-1.13	66.74	4.20
1	7	0.33	0.68	1.48	0.39	-0.93	67.63	4.21
2	8	0.38	0.63	1.60	0.47	-0.76	68.32	4.22
13	9	0.43	0.58	1.74	0.55	-0.59	71.96	4.28
15	10	0.48	0.53	1.90	0.64	-0.44	73.16	4.29
14	11	0.53	0.48	2.11	0.74	-0.30	73.16	4.29
9	12	0.58	0.43	2.35	0.86	-0.16	75.09	4.32
3	13	0.63	0.38	2.67	0.98	-0.02	75.63	4.33
20	14	0.68	0.33	3.08	1.12	0.12	76.21	4.33
5	15	0.73	0.28	3.64	1.29	0.26	78.25	4.36
4	16	0.78	0.23	4.44	1.49	0.40	78.71	4.37
12	17	0.83	0.18	5.71	1.74	0.56	80.01	4.38
7	18	0.88	0.13	8.00	2.08	0.73	81.01	4.39
11	19	0.93	0.08	13.33	2.59	0.95	81.16	4.40
8	20	0.98	0.03	40.00	3.69	1.31	88.55	4.48

ตารางที่ ก.7 การจัดลำดับใหม่ (i) สำหรับชั้นงานทดสอบสูตร KN1-3 ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชั้นงาน	i	F	$1 - F$	$1/1 - F$	$\ln(1/1 - F)$	$\ln \ln (1/1 - F)$	σ	$\ln \sigma$
10	1	0.03	0.98	1.03	0.03	-3.68	110.04	4.70
1	2	0.08	0.93	1.08	0.08	-2.55	115.00	4.74
4	3	0.13	0.88	1.14	0.13	-2.01	118.73	4.78
8	4	0.18	0.83	1.21	0.19	-1.65	122.13	4.81
17	5	0.23	0.78	1.29	0.25	-1.37	123.26	4.81
13	6	0.28	0.73	1.38	0.32	-1.13	123.68	4.82
3	7	0.33	0.68	1.48	0.39	-0.93	125.81	4.83
15	8	0.38	0.63	1.60	0.47	-0.76	127.95	4.85
6	9	0.43	0.58	1.74	0.55	-0.59	129.19	4.86
2	10	0.48	0.53	1.90	0.64	-0.44	129.73	4.87
14	11	0.53	0.48	2.11	0.74	-0.30	131.19	4.88
5	12	0.58	0.43	2.35	0.86	-0.16	131.26	4.88
9	13	0.63	0.38	2.67	0.98	-0.02	131.90	4.88
7	14	0.68	0.33	3.08	1.12	0.12	132.32	4.89
12	15	0.73	0.28	3.64	1.29	0.26	132.45	4.89
18	16	0.78	0.23	4.44	1.49	0.40	137.35	4.92
20	17	0.83	0.18	5.71	1.74	0.56	138.16	4.93
11	18	0.88	0.13	8.00	2.08	0.73	140.51	4.95
16	19	0.93	0.08	13.33	2.59	0.95	144.88	4.98
19	20	0.98	0.03	40.00	3.69	1.31	148.36	5.00

ตารางที่ ก.8 การจัดลำดับใหม่ (i) สำหรับชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-5 ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	i	F	$1 - F$	$1/1 - F$	$\ln(1/1 - F)$	$\ln \ln (1/1 - F)$	σ	$\ln \sigma$
19	1	0.03	0.98	1.03	0.03	-3.68	143.98	4.97
10	2	0.08	0.93	1.08	0.08	-2.55	148.14	5.00
15	3	0.13	0.88	1.14	0.13	-2.01	149.58	5.01
14	4	0.18	0.83	1.21	0.19	-1.65	151.64	5.0
4	5	0.23	0.78	1.29	0.25	-1.37	156.91	5.06
8	6	0.28	0.73	1.38	0.32	-1.13	161.26	5.08
3	7	0.33	0.68	1.48	0.39	-0.93	162.02	5.09
12	8	0.38	0.63	1.60	0.47	-0.76	163.01	5.09
2	9	0.43	0.58	1.74	0.55	-0.59	165.94	5.11
5	10	0.48	0.53	1.90	0.64	-0.44	167.31	5.12
20	11	0.53	0.48	2.11	0.74	-0.30	168.81	5.13
9	12	0.58	0.43	2.35	0.86	-0.16	170.38	5.14
11	13	0.63	0.38	2.67	0.98	-0.02	170.49	5.14
6	14	0.68	0.33	3.08	1.12	0.12	170.59	5.14
17	15	0.73	0.28	3.64	1.29	0.26	172.13	5.15
13	16	0.78	0.23	4.44	1.49	0.40	175.97	5.17
18	17	0.83	0.18	5.71	1.74	0.56	177.27	5.18
16	18	0.88	0.13	8.00	2.08	0.73	178.92	5.19
1	19	0.93	0.08	13.33	2.59	0.95	183.63	5.21
7	20	0.98	0.03	40.00	3.69	1.31	184.13	5.22

ตารางที่ ก.9 การจัดลำดับใหม่ (i) สำหรับชิ้นงานทดสอบสูตร KN1-7 ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 150 องศา-เซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	i	F	$1 - F$	$1/1 - F$	$\ln(1/1 - F)$	$\ln \ln (1/1 - F)$	σ	$\ln \sigma$
8	1	0.03	0.98	1.03	0.03	-3.68	167.11	5.12
2	2	0.08	0.93	1.08	0.08	-2.55	178.31	5.18
4	3	0.13	0.88	1.14	0.13	-2.01	179.37	5.19
9	4	0.18	0.83	1.21	0.19	-1.65	193.98	5.27
11	5	0.23	0.78	1.29	0.25	-1.37	198.09	5.29
6	6	0.28	0.73	1.38	0.32	-1.13	198.45	5.29
19	7	0.33	0.68	1.48	0.39	-0.93	198.70	5.29
10	8	0.38	0.63	1.60	0.47	-0.76	199.00	5.29
3	9	0.43	0.58	1.74	0.55	-0.59	199.30	5.30
15	10	0.48	0.53	1.90	0.64	-0.44	200.19	5.30
18	11	0.53	0.48	2.11	0.74	-0.30	200.89	5.30
7	12	0.58	0.43	2.35	0.86	-0.16	203.31	5.32
13	13	0.63	0.38	2.67	0.98	-0.02	206.43	5.33
20	14	0.68	0.33	3.08	1.12	0.12	211.48	5.35
12	15	0.73	0.28	3.64	1.29	0.26	212.52	5.36
5	16	0.78	0.23	4.44	1.49	0.40	215.55	5.37
17	17	0.83	0.18	5.71	1.74	0.56	217.68	5.38
1	18	0.88	0.13	8.00	2.08	0.73	229.73	5.44
14	19	0.93	0.08	13.33	2.59	0.95	231.62	5.45
16	20	0.98	0.03	40.00	3.69	1.31	244.40	5.50

ตารางที่ ก.10 การจัดลำดับใหม่ (i) สำหรับชั้นงานทดสอบสูตร KN1-9 ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 150 องศา-เซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชั้นงาน	i	F	$1 - F$	$1/1 - F$	$\ln(1/1 - F)$	$\ln \ln (1/1 - F)$	σ	$\ln \sigma$
12	1	0.03	0.98	1.03	0.03	-3.68	124.54	4.82
16	2	0.08	0.93	1.08	0.08	-2.55	219.00	5.39
8	3	0.13	0.88	1.14	0.13	-2.01	223.60	5.41
5	4	0.18	0.83	1.21	0.19	-1.65	229.95	5.44
2	5	0.23	0.78	1.29	0.25	-1.37	233.58	5.45
1	6	0.28	0.73	1.38	0.32	-1.13	234.49	5.46
3	7	0.33	0.68	1.48	0.39	-0.93	236.35	5.47
4	8	0.38	0.63	1.60	0.47	-0.76	238.22	5.47
7	9	0.43	0.58	1.74	0.55	-0.59	241.71	5.49
15	10	0.48	0.53	1.90	0.64	-0.44	248.27	5.51
20	11	0.53	0.48	2.11	0.74	-0.30	253.19	5.53
18	12	0.58	0.43	2.35	0.86	-0.16	258.71	5.56
14	13	0.63	0.38	2.67	0.98	-0.02	260.04	5.56
11	14	0.68	0.33	3.08	1.12	0.12	265.99	5.58
19	15	0.73	0.28	3.64	1.29	0.26	267.54	5.59
17	16	0.78	0.23	4.44	1.49	0.40	272.51	5.61
10	17	0.83	0.18	5.71	1.74	0.56	272.61	5.61
13	18	0.88	0.13	8.00	2.08	0.73	274.77	5.62
9	19	0.93	0.08	13.33	2.59	0.95	276.44	5.62
6	20	0.98	0.03	40.00	3.69	1.31	278.46	5.63

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบความแข็ง

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดเส้นทแยงมุมบนชิ้นงานสูตร KN1-3 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วย Vickers microhardness

ตำแหน่ง ทดสอบ	น้ำหนักกด									
	100 gf		200 gf		500 gf		1000 gf		5000 gf	
	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)
1	145.8	126.5	155.6	146.4	358.7	331.2	539.1	598.1	612.4	599.0
2	160.5	174.2	147.6	128.6	380.3	392.2	573.1	598.0	670.2	636.2
3	251.0	279.1	203.4	219.7	207.0	258.9	265.4	361.6	438.0	407.0
4	173.8	164.0	198.8	188.1	206.5	204.8	338.6	351.3	453.0	464.4
5	146.7	164.8	203.9	199.5	379.7	396.6	494.7	495.6	554.6	557.5
6	153.6	153.6	234.7	218.5	379.3	404.0	336.2	336.7	519.5	548.3
7	148.9	179.1	270.5	254.0	354.1	298.0	421.5	503.1	494.4	485.5
8	162.9	139.2	288.9	284.3	326.9	366.0	364.0	374.7	596.2	599.4
9	148.3	173.9	299.1	288.9	277.1	292.6	188.7	185.9	423.7	394.5
10	168.6	141.5	242.9	210.3	300.6	242.2	230.1	168.3	424.8	415.4

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดเส้นทแยงมุมบนชิ้นงานสูตร KN1-5 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วย Vickers microhardness

ตำแหน่ง ทดสอบ	น้ำหนักกด									
	100 gf		200 gf		500 gf		1000 gf		5000 gf	
	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)
1	104.0	92.6	291.0	259.4	171.4	145.1	462.7	465.4	553.2	510.3
2	156.8	138.2	245.8	257.4	246.4	268.3	332.3	295.4	518.4	523.8
3	265.5	265.1	226.6	222.1	164.0	160.9	355.2	403.0	459.2	459.7
4	199.4	169.5	217.5	207.2	288.1	309.3	286.1	254.6	641.5	588.6
5	154.1	167.1	175.5	191.1	332.6	321.2	307.1	348.2	566.8	594.7
6	157.5	149.4	193.1	189.1	359.3	332.2	368.6	345.5	580.1	612.4
7	93.7	98.8	301.8	308.2	290.3	303.8	187.0	193.5	443.3	405.3
8	109.7	118.5	256.9	248.0	334.2	302.1	178.0	197.7	443.3	435.5
9	144.2	121.3	124.1	161.3	346.3	354.8	328.4	289.5	492.2	459.9
10	102.9	127.6	192.1	191.9	331.5	353.5	326.9	308.7	459.9	466.7

ตารางที่ ข.3 ผลการวัดเส้นทแยงมุมบนชิ้นงานสูตร KN1-7 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วย Vickers microhardness

ตำแหน่ง ทดสอบ	น้ำหนักกด									
	100 gf		200 gf		500 gf		1000 gf		5000 gf	
	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)
1	121.8	113.2	155.9	167.1	365.6	368.2	280.6	270.0	701.7	715.6
2	152.6	139.2	177.6	186.3	337.0	336.7	294.8	334.9	625.5	565.1
3	148.1	168.0	123.2	140.9	256.5	259.8	429.3	481.6	625.5	540.4
4	131.9	149.6	198.3	193.8	333.4	312.4	455.1	490.7	539.6	544.5
5	139.7	153.8	167.3	169.2	309.4	319.1	308.0	337.5	509.8	450.1
6	142.8	123.5	216.7	165.8	332.7	310.8	263.3	239.9	475.0	526.3
7	126.5	137.7	135.9	149.5	223.7	189.1	423.1	393.8	511.6	518.5
8	123.1	151.4	185.6	195.1	261.8	219.5	410.7	382.4	471.2	470.4
9	124.2	134.6	164.2	171.1	292.0	316.1	322.5	321.1	435.2	445.6
10	145.3	113.0	152.2	164.0	323.5	325.8	210.8	245.3	408.0	399.4

ตารางที่ ข.4 ผลการวัดเส้นทแยงมุมบนชิ้นงานสูตร KN1-9 อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ด้วย Vickers microhardness

ตำแหน่ง ทดสอบ	น้ำหนักกด									
	100 gf		200 gf		500 gf		1000 gf		5000 gf	
	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)	d1 (μm)	d2 (μm)
1	150.0	167.4	177.1	191.0	356.4	338.2	281.9	282.8	517.9	489.2
2	147.3	135.9	268.9	206.1	260.0	253.3	273.8	275.6	471.7	461.7
3	158.6	143.9	323.4	300.3	312.1	301.2	322.2	284.5	571.5	575.5
4	138.4	151.1	236.1	232.4	298.0	278.8	279.5	252.1	513.6	493.1
5	144.5	137.2	353.9	366.9	295.7	290.5	376.4	357.5	531.4	519.6
6	141.0	134.4	166.9	181.7	285.5	274.2	345.8	259.1	365.8	393.9
7	143.5	137.2	182.1	155.2	388.5	423.2	367.8	337.9	400.7	399.0
8	127.9	144.4	195.3	202.6	245.6	258.5	341.0	383.4	431.6	412.2
9	111.7	99.4	185.2	175.6	289.8	321.3	253.4	240.8	385.7	345.4
10	89.7	93.5	167.5	172.3	283.6	277.5	303.7	284.0	355.5	327.0

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความทนต่อการขัดสีโดยการวัดความยาวรอยสึก

ตารางที่ ค.1 ผลการวัดความยาวรอยสึกของชิ้นงานทดสอบ อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชิ้นงานทดสอบ	ชั้นที่	ความยาวรอยสึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกขัดออก (mm^3)	ชิ้นงานทดสอบ	ชั้นที่	ความยาวรอยสึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกขัดออก (mm^3)
KN1-3	1	59.7	1,809	KN1-7	1	41.6	603
	2	44.6	746		2	37.7	444
	3	55.0	1,419		3	40.0	540
	4	58.0	1,689		4	42.9	672
	5	52.7	1,232		5	38.3	481
	เฉลี่ย		1,378 $\pm$ 419		เฉลี่ย		548 $\pm$ 92
KN1-5	1	43.0	672	KN1-9	1	29.0	205
	2	43.6	696		2	34.3	345
	3	49.2	999		3	36.3	409
	4	47.6	909		4	31.4	262
	5	46.9	880		5	36.8	427
	เฉลี่ย		831 $\pm$ 142		เฉลี่ย		330 $\pm$ 95

ตารางที่ ค.2 ผลการวัดความยาวรอยสึกของชิ้นงานทดสอบ PAA เเผาที่อุณหภูมิ 700 และ 1200 องศาเซลเซียส

ชิ้นงานทดสอบ	ชั้นที่	ความยาวรอยสึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกขัดออก (mm^3)	ชิ้นงานทดสอบ	ชั้นที่	ความยาวรอยสึก (mm)	ปริมาตรที่ถูกขัดออก (mm^3)
PAA 700 °C	1	67.1	2,596	PAA 1200 °C	1	21.2	77
	2	67.7	2,656		2	24.3	123
	เฉลี่ย		2626 $\pm$ 42		เฉลี่ย		100 $\pm$ 32

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบความขาวตามระบบ CIE LAB

ตารางที่ ง.1 ผลการทดสอบความขาวของตัวอย่างยางคอมปาวด์ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตั้งแต่ 0 – 20 phr ก่อนอบ และ หลังอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

TiO ₂ (phr)	ครั้งที่	ก่อนอบ				TiO ₂ (phr)	ครั้งที่	หลังอบ			
		L *	a *	b *	WI			L *	a *	b *	WI
0	1	51.92	1.66	23.58	46.4	0	1	21.68	6.09	23.35	18.0
	2	52.05	-1.34	22.78	46.9		2	21.42	8.94	24.19	17.3
	3	51.33	1.06	23.11	46.1		3	21.23	7.44	21.65	18.0
	เฉลี่ย				46.5 ± 0.4		4	22.27	8.94	21.34	18.9
							เฉลี่ย				18.0 ± 0.6
5	1	91.70	0.76	13.48	84.2	5	1	78.58	5.09	26.30	65.7
	2	90.32	0.87	14.18	82.8		2	79.14	2.81	27.04	65.7
	3	91.03	0.72	13.32	83.9		3	77.85	5.73	27.28	64.4
	เฉลี่ย				83.6 ± 0.7		4	79.04	5.28	26.67	65.7
							เฉลี่ย				65.4 ± 0.6
15	1	93.46	0.75	11.23	87.0	15	1	86.58	2.60	22.99	73.3
	2	93.39	0.78	10.88	87.2		2	84.82	2.99	25.43	70.2
	3	93.22	0.73	11.06	87.0		3	87.38	0.14	23.29	73.5
	เฉลี่ย				87.1 ± 0.2		4	86.99	2.39	22.89	73.6
							เฉลี่ย				72.6 ± 1.6
20	1	91.43	0.32	11.44	85.7	20	1	83.49	3.06	22.33	72.1
	2	93.66	-0.79	11.38	86.9		2	84.46	3.00	22.75	72.3
	3	93.28	0.34	11.61	86.6		3	83.89	3.10	22.65	72.0
	เฉลี่ย				86.4 ± 0.6		4	84.90	0.81	22.64	72.8
							เฉลี่ย				72.3 ± 0.3

ตารางที่ ง.2 ผลการทดสอบความขาวของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ตั้งแต่ 0 – 50 phr อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

สูตร	ครั้งที่	L *	a *	b *	WI
Ref	1	91.99	1.05	8.20	88.5
	2	92.23	1.01	7.62	89.1
	3	90.91	0.98	7.93	87.9
	เฉลี่ย				88.5 ± 0.6
KN1-9 T0	1	81.33	2.07	18.80	73.4
	2	81.33	3.77	18.53	73.4
	3	81.34	3.74	16.31	74.9
	เฉลี่ย				73.9 ± 0.9
KN1-9 T5	1	84.42	2.98	14.01	78.8
	2	84.53	1.50	14.11	79.0
	3	83.50	3.10	12.60	79.0
	เฉลี่ย				79.0 ± 0.1
KN1-9 T20	1	84.82	2.81	13.60	79.4
	2	85.67	2.59	14.18	79.7
	3	85.27	2.67	13.92	79.6
	เฉลี่ย				79.6 ± 0.1
KN1-9 T50	1	81.32	3.99	23.14	70.0
	2	81.35	4.01	23.20	70.0
	3	81.52	3.89	22.84	70.4
	เฉลี่ย				70.1 ± 0.2

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความขาวของตัวอย่างสูตร KN1-9 ที่เติมไทเทเนียมไดออกไซด์ และสี
ธรรมชาติสีแดง อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ตัวอย่างอ้างอิง						ตัวอย่างเติมสีธรรมชาติสีแดง						
สูตร	ครั้งที่	L	a*	b*	WI	สูตร	ครั้งที่	L	a*	b*	WI	
KN1-9 T0	1	81.33	2.07	18.80	73.4	KN1-9 T0 R2	1	76.22	3.56	27.72	63.3	
	2	81.33	3.77	18.53	73.4		2	75.98	6.11	27.04	63.3	
	3	81.34	3.74	16.31	74.9		3	75.70	6.15	27.23	63.0	
	เฉลี่ย				73.9 ± 0.9		4	75.32	6.20	27.27	62.7	
					เฉลี่ย					63.1 ± 0.3		
						KN1-9 T0 R6	1	77.98	3.32	27.56	64.6	
							2	76.73	6.13	26.73	64.0	
							3	76.74	6.14	26.72	64.0	
							4	76.90	6.00	27.22	63.8	
							เฉลี่ย					64.1 ± 0.3
KN1-9 T5	1	84.42	2.98	14.01	78.8	KN1-9 T5 R2	1	75.90	6.47	27.62	62.8	
	2	84.53	1.50	14.11	79.0		2	75.98	6.43	27.62	62.8	
	3	83.50	3.10	12.60	79.0		3	77.17	3.64	28.37	63.4	
	เฉลี่ย				79.0 ± 0.1		4	76.10	6.92	27.74	62.7	
					เฉลี่ย					62.9 ± 0.3		
						KN1-9 T5 R6	1	77.40	5.99	26.77	64.5	
							2	77.36	6.08	26.90	64.3	
							3	77.35	6.04	26.74	64.4	
							เฉลี่ย					64.4 ± 0.1
KN1-9 T20	1	84.82	2.81	13.60	79.4	KN1-9 T20 R6	1	78.51	5.64	25.89	65.9	
	2	85.67	2.59	14.18	79.7		2	78.83	5.54	25.89	66.1	
	3	85.27	2.67	13.92	79.6		3	79.08	3.23	26.28	66.3	
	เฉลี่ย				79.6 ± 0.1		4	78.58	5.59	25.44	66.3	
					เฉลี่ย					66.1 ± 0.2		

ภาคผนวก จ

สรุปข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่อร่างรายงานฉบับสมบูรณ์

ข้อคิดเห็น / ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิโดยนักวิจัย
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 1	
1. ในการทดสอบการวัดความแข็ง นักวิจัยควรแสดงข้อมูลของ Control (ดินปกติ) มาเปรียบเทียบกับดินผสมน้ำยางคอมปาวด์	ในการวัดความแข็ง (Hardness) ที่จะใช้ดินปกติมาเปรียบเทียบกับนั้น หากเป็น - ดินไม่เผา : เมื่อมีแรงมากจะทำอนุภาคดินไม่ยึดติดกัน - ดินเผา 700 °C : ลักษณะพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ มีทั้งบริเวณที่เป็นดินและรูพรุน ค่าการทดสอบที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง นอกจากนั้นดินเผาจะเปราะ แรงกดอาจทำให้เกิดรอยแตกบริเวณมุมของรอยกดได้ - ดินเผา 1200 °C : การเผาทำให้องค์ประกอบทางแร่หรือเฟสมีการเปลี่ยนแปลงไปจากดินที่ยังไม่ได้เผา ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างจุลภาคมีการเปลี่ยนแปลง ยกตัวอย่างเช่น เนื้อดินทางเซรามิกก่อนเผานั้นมักจะประกอบด้วย Feldspar (เช่น $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ หรือ $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) และ Quartz ($SiO_2$) ปะปนในแร่ดิน (เช่น $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นต้นไป มักเปลี่ยนเป็น Mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ หรือ $2Al_2O_3 \cdot SiO_2$) และ Quartz (SiO_2) ใน Glassy matrix เป็นต้น² การทดสอบความแข็ง จึงไม่ควรพิจารณาใช้ ดินปกติ เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบ เนื่องจากค่าที่วัดมีโอกาสผันแปรไปตามลักษณะโครงสร้างจุลภาค

² Wattanasiriweeh, D. and Wattanasiriweeh S., Phase and microstructure investigation of thai vitreous ceramic bodies. Proceeding of the 1st Mae Fah Luang University International Conference, 2012, 1-8.

ข้อคิดเห็น / ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิโดยนักวิจัย
2. ควรทดสอบสมบัติ Performance ของชิ้นงานจริง เมื่อนำไปใช้งาน เช่น ถ้าเป็นส่วนประกอบอาคารที่อยู่อาศัยควรทดสอบเรื่องการติดไฟ ถ้าใช้แทนเซรามิกจะเป็นประเภทใด มีข้อเด่นข้อด้อยอย่างไรในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ	ตัวอย่าง Earthenware doll เผาที่ 900–1000 °C  หากใช้ดินผสมน้ำยางคอมปาวด์หล่อขึ้นรูปและอบแทนที่จะเผาเหมือนการผลิตเซรามิกโดยทั่วไปสามารถช่วยลดต้นทุนพลังงานได้ ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานดังตัวอย่างข้างต้น การทดสอบความแข็งแรงและการขีดสีน่าจะครอบคลุมแล้ว แต่ประเด็นของกลิ่นยางจะจัดเป็นข้อด้อยของผลิตภัณฑ์
ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 2	
1. ขอให้นักวิจัยทบทวนในส่วนที่นักวิจัยอ้างว่า “การประเมินความทนต่อการขีดสีจึงไม่สามารถประเมินจากการทดสอบความแข็งได้” นั้น ควรจะมีคำอธิบายเหตุผลเชิงวิชาการที่จะสื่อให้ผู้อ่านเข้าใจและรับได้	ความแข็ง (Hardness) เป็นสิ่งอธิบายถึงสมบัติของวัสดุในแง่ของความต้านทานต่อแรงทางกลที่จะทำให้วัสดุนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร (Plastic deformation) เช่น ความต้านทานต่อการกดจากวัสดุอื่น ความต้านทานต่อแรงขีดข่วน ส่วนการสึกหรอ (Wear) เป็นการหลุดของผิววัสดุจากการถูแรงกระทำขณะที่ผิวเคลื่อนที่สัมผัสกับอีกผิวหนึ่ง โดยการสึกหรอนั้นมีหลายแบบ เช่น การสึกหรอจากการไถลระหว่างผิว (Sliding wear) การขีดถูของอนุภาคกับผิว (Abrasion) การชนของอนุภาคขนาดเล็กหรือของไหลกับผิว (Erosion) เป็นต้น

ข้อคิดเห็น / ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิโดยนักวิจัย
	ซึ่งโดยทั่วไปความแข็งมักสัมพันธ์กับความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ (Wear resistance) ดังรูป สำหรับการทดลองใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องเซรามิก มอก. 2398 เล่ม 6-2553 ซึ่งจัดเป็นการทดสอบการขัดถูของอนุภาคกับผิว โดยผลการทดสอบยืนยันว่า ปริมาตรของชิ้นงานที่ถูกขัดออกมีค่าลดลง (ความต้านทานการสึกหรอดีขึ้น) ตามปริมาณการเพิ่มน้ำยาคอมปาวด์ในชิ้นงานทดสอบ ทั้งๆ ที่ชิ้นงานแต่ละสูตรมีค่าความแข็งไม่ต่างกัน ดังนั้นสำหรับการทดลองนี้ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับความต้านทานการสึกหรอ จึงได้กล่าวว่า การประเมินความทนต่อการขัดสีจึงไม่สามารถประเมินจากการทดสอบความแข็งได้

ข้อคิดเห็น / ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ตอบข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิโดยนักวิจัย
2. นักวิจัยควรทบทวนการให้ข้อเสนอแนะหน้าที่ 5 ไม่น่าจะถูกต้อง เนื่องจากสารตัวเร่ง (Accelerator) ของปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization) ไม่น่ามีผลมากนักต่อสมบัติทางกายภาพตามที่นักวิจัยใช้ในการทดสอบ	ข้อเสนอแนะหน้าที่ 5 ได้ปรับเป็น ศึกษาผลของสัดส่วนการใช้กำมะถัน/สารตัวเร่ง ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ
3. ขอให้นักวิจัยปรับปรุงข้อสรุปให้ชัดเจนว่า ผลการวิจัยตอบวัตถุประสงค์แต่ละข้อมากน้อยเพียงใด / อย่างไร	ปรับปรุงข้อสรุป หน้า 4 และหน้า 35