



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าจากถ่านชาร์โคลวัสดุเหลือทิ้งของการแปรรูปแมคคาเดเมีย Facial foam product from charcoal derived of macadamia processing waste.

ณัฐภัทร กาญจนเรืองรอง¹ ศรีนยา ประทีปชนะชัย¹ ธงชัย เครือผือ^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

² สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Nattapat Kanchanarangrong¹ Sarinya Prateepchanacha¹ Thongchai Khruaphue^{2*}

¹ Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, 24000, Thailand.

² Program in Industrial Engineering Technology and Logistics, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, 67000, Thailand.

* Corresponding author.

E-mail: Thongchai.k@pcru.ac.th; Telephone: 0 9937 9555 8

วันที่รับบทความ 25 มีนาคม 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 8 พฤษภาคม 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 26 พฤษภาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ -31 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโฟมล้างหน้าจากถ่านชาร์โคลที่ได้จากกะลาแมคคาเดเมีย และศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดอนุภาคถ่านและปริมาณการผสมที่มีต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัยชนิด 3×5 full factorial design ได้แก่ ขนาดผงถ่าน 3 ระดับ (0.05, 0.10 และ 0.15 มิลลิเมตร) และปริมาณการผสมผงถ่าน 5 ระดับ (10, 20, 30, 40, and 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ซึ่งในการออกแบบการทดลองแบบ full factorial design ถูกใช้ในขั้นตอนการพัฒนาสูตรเพื่อประเมินค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าแรงตึงผิว และประสิทธิภาพการทำความสะอาด จากนั้นสูตรที่เหมาะสมที่สุดถูกนำไปประเมินการระคายเคืองผิวและความพึงพอใจของผู้ใช้ในอาสาสมัครจำนวน 40 คน ผลการทดลองแสดงแนวโน้มว่าขนาดของผงถ่านและปริมาณการผสมผงถ่านมีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ในด้านประสิทธิภาพผงถ่านขนาด 0.05 มิลลิเมตร ให้ผลการทำความสะอาดที่ดีที่สุด มีพื้นที่ผิวจำเพาะและศักยภาพในการดูดซับสูง ขณะที่ปริมาณการผสมผงถ่านที่เหมาะสมที่สุดคือ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่า pH เฉลี่ย 5.3 ค่าแรงตึงผิวในช่วง 25–35 mN/m และให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุดประมาณ 94.8% เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบในอาสาสมัครยืนยันว่าผลิตภัณฑ์มีความอ่อนโยนต่อผิว โดยมีการระคายเคืองในระดับต่ำและลดลงตามระยะเวลาใช้งาน ขณะที่ความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับสูงเฉลี่ย 8 จาก 9 คะแนน

คำสำคัญ

ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า ถ่านชาร์โคลวัสดุเหลือทิ้ง แมคคาเดเมียเขาค้อ การทดลองแบบแฟคทอเรียล ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

Abstract

This study was conducted with the objective of developing a facial cleansing foam derived from charcoal obtained from macadamia nutshells and investigating the relationship between charcoal particle size and loading concentration on the physicochemical and functional properties of the formulation. A two-factor (3×5) full factorial experimental design was employed, comprising three levels of particle size (0.05, 0.10, and 0.15 millimeters) and five levels of charcoal loading concentration (10, 20, 30, 40, and 50 percent by weight). The full factorial design was applied during the formulation

development stage to evaluate pH, surface tension, and cleansing efficiency. The optimal formulation was subsequently selected for evaluation of skin irritation potential and user satisfaction in 40 volunteers. The experimental results suggested that both particle size and loading concentration influenced the properties of the formulation. The particle size 0.05 millimeters demonstrated superior cleansing efficiency, which was attributed to its higher specific surface area and enhanced adsorption capability. Among the tested formulations, the 20 percent by weight charcoal concentration was identified as the optimal level, yielding a mean pH of 5.3, which is appropriate for topical skin application. In addition, this formulation exhibited a surface tension within the range of 25–35 mN/m and the highest cleansing efficiency of approximately 94.8% compared with other experimental conditions. Evaluation in human subjects confirmed that the formulation was well tolerated, with only mild initial skin irritation that diminished over time. Overall user acceptance was high, with a mean satisfaction score of 8 out of 9, indicating favorable consumer response to the developed product.

Keywords

facial foam product; waste-derived charcoal; Khao Kho macadamia; factorial experimental design; cleansing efficiency

1. ความสำคัญและที่มา

จังหวัดเพชรบูรณ์เป็นพื้นที่ศักยภาพทางการเกษตรที่สำคัญของภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย ด้วยลักษณะภูมิประเทศแบบผสมผสานระหว่างพื้นที่ราบและภูเขาสูง มีสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจหลากหลายชนิด โดยเฉพาะถั่วแมคคาเดเมีย (Macadamia nut) ซึ่งเป็นพืชที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของชาวไทยภูเขาและสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับชุมชน จากความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้ต้องเพิ่มอัตราการผลิตรายมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมาก โดยเฉพาะกะลาแมคคาเดเมียจากกระบวนการกะเทาะเมล็ด ซึ่งยังไม่ได้รับการใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ

ในเชิงวิชาการกะลาแมคคาเดเมียจัดเป็นวัสดุชีวมวลที่มีองค์ประกอบคาร์บอนสูงและมีโครงสร้างพรุน ซึ่งเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นถ่านชาร์โคลหรือถ่านกัมมันต์ [1] ที่มีคุณสมบัติเด่นด้านการดูดซับสารปนเปื้อน กลิ่น และอนุมูลอิสระ [2] ส่งผลให้สามารถดูดซับน้ำมันส่วนเกิน สิ่งสกปรก และสารตกค้างบนผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีความคงตัวทางโครงสร้างและทนต่อการเสื่อมสภาพ จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในงานวิจัยด้านผลิตภัณฑ์ดูแลผิวและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ [3] คุณสมบัติดังกล่าวทำให้ถ่านกัมมันต์ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางรวมถึงอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง [1, 3] สอดคล้องกับแนวโน้มผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับผลิตภัณฑ์

จากธรรมชาติ ส่งผลให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

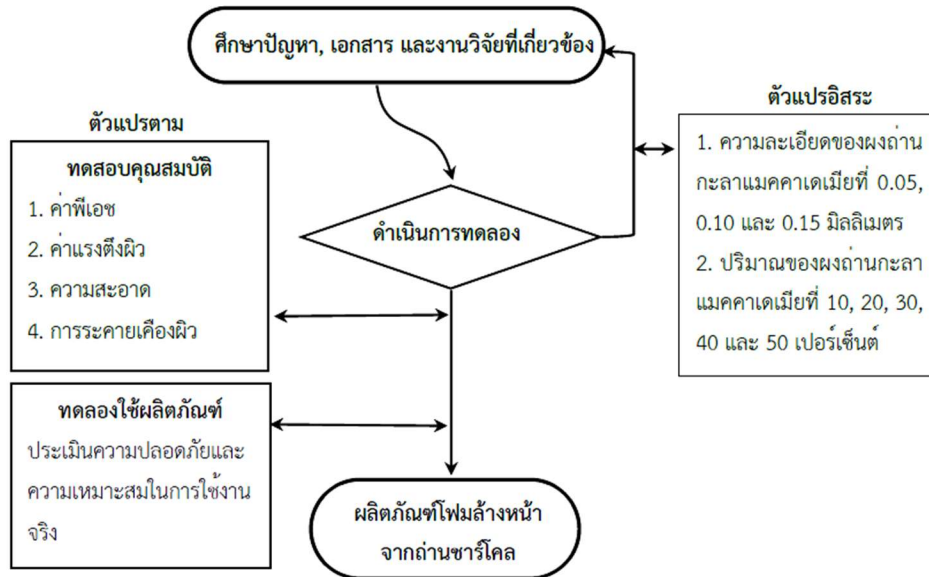
แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้านี้จะชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของกะลาแมคคาเดเมียในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ดูแลผิว เช่น ผลิตภัณฑ์ขัดผิวที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งสกปรก [4] แต่การศึกษาในรูปแบบโฟมล้างหน้ายังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะการทำความเข้าใจผลของตัวแปรที่สำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น ขนาดของผงถ่านและปริมาณการผสม ซึ่งอาจส่งผลโดยตรงต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าแรงตึงผิว (mN/m) ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด และการระคายเคืองผิว [5] จากการศึกษาข้างต้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของผงถ่านกับคุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้ง ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวที่มีส่วนผสมของถ่านกัมมันต์จำเป็นต้องคำนึงถึงมาตรฐานความปลอดภัยด้านเครื่องสำอางและการระคายเคืองต่อผิวหนัง เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อผิวหนังและความปลอดภัยของอนุภาคผงถ่านต่อการใช้งานในระยะยาว [5, 6] ดังนั้นการศึกษาย่อยที่มีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาสูตรที่มีทั้งประสิทธิภาพและความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาโฟมล้างหน้าจากถ่านชาร์โคลกะลาแมคคาเดเมีย โดยให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์หัตถิพลของขนาดผงและปริมาณการผสมต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้สูตรที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อผู้บริโภค อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และสนับสนุนการพัฒนาเชิงพาณิชย์ในระดับชุมชนอย่างยั่งยืน [6]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตครอบคลุมทั้งเชิงแนวคิด การทดลอง และการประเมินผลอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจาก

การศึกษาทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดกรอบแนวคิด ตัวแปร และวิธีการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์โพลีแลมบ์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตการวิจัยผลิตภัณฑ์โพลีแลมบ์จากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

ขอบเขตเชิงทดลองงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของตัวแปรอิสระ 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) ความละเอียดของผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ขนาด 0.05, 0.10 และ 0.15 มิลลิเมตร ซึ่งมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการดูดซับ และ (2) ปริมาณการผสมของผงถ่านที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลต่อความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ในสูตรผลิตภัณฑ์ โดยตัวแปรทั้งสองถูกออกแบบให้ครอบคลุมช่วงที่คาดว่าจะส่งผลต่อสมบัติของโพลีแลมบ์ และขอบเขตด้านการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ครอบคลุมการวิเคราะห์เชิงกายภาพและเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งมีผลต่อความสมดุลของผิว ค่าแรงตึงผิว (mN/m) ที่สะท้อนความสามารถในการลดแรงตึงผิวและการเกิดฟองประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาด (%) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการขจัดสิ่งสกปรก และการระคายเคืองผิว ทั้งนี้การทดสอบดำเนินการภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มอก. เอส 16-2561 เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ และสามารถอ้างอิงได้ในเชิงวิชาการ [7]

2.2 กระบวนการเตรียมผงถ่านกะลาแมคคาเดเมีย

จากรูปที่ 2 แสดงกระบวนการเตรียมผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียชาร์โคลเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการพัฒนาโพลีแลมบ์ โดยเริ่มจากการคัดแยกและทำความสะอาดกะลาแมคคาเดเมียเพื่อลดสิ่งปนเปื้อนและสิ่งแปลกปลอม ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการเผา

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเตรียมเตาเผาแบบปิดโดยใช้ไม้พิน (ไม้มะขาม) เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องและยาวนาน โดยภายในจะทำการใส่ถ่านเพื่อบรรจุกะลาแมคคาเดเมีย ดังรูปที่ 2(ก) การเตรียมวัสดุในการเผา [4, 8]

ขั้นตอนที่ 2 ทำการบรรจุกะลาแมคคาเดเมียลงในถังตรงกลางแล้วทำการปิดฝาขณะทำการเผา ทำการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส วัดอุณหภูมิภายในเตาด้วย Thermocouple Type K เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาดังรูปที่ 2(ข) เพื่อให้เกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้ได้ถ่านที่มีโครงสร้างคาร์บอนพูนสูง ซึ่งเอื้อต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและ

ความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนและสิ่งสกปรก ทั้งนี้ ถ่านที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ดสีดำดังรูปที่ 2(ค) ถ่านแมคคาเดเมียจากการเผา ซึ่งถือเป็นวัสดุเริ่มต้นสำหรับกระบวนการแปรรูปในขั้นตอนถัดไป [4, 9]

ขั้นตอนที่ 3 เตรียมเครื่องบดแรงเหวี่ยงแบบใบมีดหมุนความเร็วสูง ดังรูปที่ 2 (ง) และทำการบดถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการเผาที่ 25,000 รอบต่อนาที (rpm) เพื่อให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่ 4 นำผงถ่านที่ได้จากการบดละเอียดไปทำการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานดังรูปที่ 2(จ) โดยใช้ตะแกรงขนาด

100, 150 และ 250 เมช เพื่อให้ได้ขนาดผงถ่านประมาณ 0.15, 0.10 และ 0.05 มิลลิเมตร ตามลำดับ และผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่ผ่านการร่อนแล้วดังรูปที่ 2(ฉ) มีลักษณะเป็นผงสีดำเนื้อละเอียด สามารถกระจายตัวได้ดีในระบบโฟม และมีคุณสมบัติในการดูดซับที่เหมาะสมต่อการกำจัดสิ่งสกปรกและสารปนเปื้อนบนผิวหนัง [1, 2] ทำให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าที่ต้องการทั้งประสิทธิภาพและความปลอดภัย



รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียชาร์โคล

2.3 กระบวนการทดลองผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า

2.3.1 ส่วนผสมและสูตรที่ใช้ในการผลิตโฟมล้างหน้า

งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ปัจจัยชนิด 3×5 full factorial design เนื่องจากสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองปัจจัยได้พร้อมกันในชุดการทดลองเดียว ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งผลของแต่ละปัจจัยและผลร่วมกันของปัจจัยที่มีต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง เพิ่มความแม่นยำของข้อมูล และทำให้ผลการวิจัยมีความน่าเชื่อถือมาก

ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองแบบศึกษาที่ละปัจจัย นอกจากนี้ การทำซ้ำในการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ยังช่วยตรวจสอบความสม่ำเสมอของผลการทดลองและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง [7] ภายใต้การวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) [10, 11] เพื่อศึกษาผลของตัวแปรอิสระและอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่มีต่อคุณสมบัติของโฟมล้างหน้าจากถ่านกะลาแมคคาเดเมีย โดยกำหนดให้ ปริมาณผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียเป็นปัจจัยที่ 1 จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกำหนดให้ขนาดของผงถ่าน เป็นปัจจัยที่ 2 จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 0.05, 0.10 และ 0.15 มิลลิเมตร การจัดระดับของทั้งสองปัจจัยในลักษณะ 3×5 full factorial design ทำให้เกิดชุดการทดลองทั้งหมด 15 ชุดการทดลอง (3×5 combinations) ซึ่งครอบคลุมทุกความเป็นไปได้ของการผสมระดับตัวแปรทั้งสอง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล แต่ละชุดการทดลองถูกดำเนินการซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ส่งผลให้มีหน่วยทดลองรวมทั้งสิ้น 45 หน่วยทดลอง โดยหน่วยทดลองดังกล่าวใช้เฉพาะในขั้นตอนการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ภายใต้การออกแบบแบบแฟคทอเรียลเท่านั้น ส่วนการทดลองในอาสาสมัครจำนวน 40 คน เป็นขั้นตอนการประเมินยืนยันสูตรที่คัดเลือกแล้ว เพื่อประเมินความปลอดภัยเบื้องต้น การระคายเคืองผิว และความพึงพอใจของผู้ใช้ ไม่ได้นำมาเป็นหน่วยทดลองของ factorial design โดยมีการสุ่มลำดับการทดลองอย่างสมบูรณ์ เพื่อลดอิทธิพลของปัจจัยแทรกซ้อนที่อาจส่งผลต่อผลการทดลอง และในแต่ละชุดการทดลอง ผงถ่านกะลาแมคคาเดเมียที่มีขนาดและปริมาณตามที่กำหนดจะถูกนำไปใช้เป็นองค์ประกอบในสูตรโฟมล้างหน้า จากนั้นจึงทำการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าแรงตึงผิว (surface tension) ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด และการระคายเคืองผิว [4] เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

สูตรโฟมล้างหน้าที่พัฒนาขึ้นมีการออกแบบให้เกิดความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการทำความสะอาด ความคงตัวและความปลอดภัยต่อผิว โดยวิสาหกิจชุมชนกลุ่มสมุนไพรเพื่อ

สุขภาพเขาค้อ (ชญานิน) เป็นผู้ร่วมพัฒนาสูตร ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 16/2561 เรื่องผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด สบู่ล้างมือ ดังตารางที่ 1 โดยใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายหลัก (62 %) และ Sodium lauryl sulfate (15 %) เป็นสารลดแรงตึงผิว สำหรับ ขจัดสิ่งสกปรก ร่วมกับ Coconut diethanolamide (12.50 %) เพื่อเสริมการเกิดฟองและความของโฟม Glycerin (7.50 %) ทำหน้าที่เพิ่มความชุ่มชื้น ส่วน Pearl extract (อย่างละ 0.50 %) ช่วยเสริมคุณสมบัติการบำรุงผิว Phenoxyethanol (0.50 %) ทำหน้าที่เป็นสารกันเสีย และ Fragrance (0.50 %) ช่วยเพิ่มความน่าใช้ของผลิตภัณฑ์ โดย Sodium chloride (1.50 %) ใช้ปรับความหนืดให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการเติมผงถ่านชาร์โคลกะลาแมคคาเดเมียแบบเพิ่มเข้าไปจากสูตรควบคุม (add-on) โดยกำหนดปริมาณการเติมเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสูตรพื้นฐาน ซึ่งเป็นแนวทางที่ช่วยให้สามารถศึกษาผลของผงถ่านชาร์โคลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง เนื่องจากส่วนประกอบพื้นฐานของสูตรยังคงมีปริมาณเท่าเดิมในทุกชุดการทดลอง การทดลองนี้จะช่วยเพิ่มความชัดเจนในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่ศึกษา โดยเฉพาะผลของขนาดอนุภาคและปริมาณการเติมผงถ่านชาร์โคล นอกจากนี้ยังช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการปรับลดสัดส่วนขององค์ประกอบอื่นภายในสูตร ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์และทำให้ยากต่อการอธิบายผลการทดลองในเชิงวิชาการ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบและอัตราส่วนของสูตรโฟมล้างหน้า

ชื่อวิทยาศาสตร์/ภาษาอังกฤษ	ปริมาณทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ชื่อวิทยาศาสตร์/ภาษาอังกฤษ	ปริมาณทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
Water	62.00	Pearl Extract	0.50
Sodium lauryl sulfate	15.00	Phenoxyethanol	0.50
Coconut diethanolamide	12.50	Fragrance	0.50
Glycerin	7.50	Sodium Chloride	1.50

2.3.2 กรรมวิธีการผลิตโฟมล้างหน้า

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมสารละลายพื้นฐาน (Primary Solution Preparation) ทำการชั่งและตวงสารลดแรงตึงผิวหลัก ได้แก่ Sodium lauryl sulfate (SLS) และน้ำกลั่นตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นนำมาผสมในภาชนะและกวนด้วยเครื่องกวนเชิงกลจนสารละลายมีความเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้สารลดแรงตึงผิวละลายอย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 3(ก)

ขั้นตอนที่ 2 การเติมสารประกอบและสารออกฤทธิ์ (Addition of Functional Ingredients) เติมส่วนประกอบอื่นลงในสารละลายพื้นฐานที่ละชนิด ได้แก่ Coconut diethanolamide (สารเพิ่มฟองและความคงตัวของฟอง), Glycerin (สารให้ความชุ่มชื้น), Pearl extract, Phenoxyethanol (สารกันเสีย) และ Fragrance (สารให้กลิ่น) และผงถ่านกัมมาแมคคาเดเมีย (charcoal), Macadamia extract จะทำการเติมและผสมตามตัวแปรการทดลองที่ออกแบบไว้ หลังจากนั้นทำการตีผสมโดยเครื่องกวนอย่างต่อเนื่องจนได้ส่วนผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3(ข)

ขั้นตอนที่ 3 การปรับคุณสมบัติและควบคุมคุณภาพ (Property Adjustment and Quality Control) ตรวจสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เบื้องต้น และทำการปรับค่าความหนืดของโฟมโดยการเติม Sodium chloride (NaCl) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืด (viscosity modifier) ให้มีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 5,000–8,000 centipoise (cP) จากนั้นกวนต่อจนได้เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอและมีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม ดังรูปที่ 3(ค) และ ดังรูปที่ 3(ง)

ขั้นตอนที่ 4 การบรรจุผลิตภัณฑ์ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปบรรจุลงในหลอดพลาสติกโดยใช้เครื่องบรรจุหลอดอัตโนมัติ เพื่อให้การบรรจุมีความแม่นยำ รวดเร็ว และลดการปนเปื้อนระหว่างกระบวนการผลิต อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 3(จ)

ขั้นตอนที่ 5 การติดฉลากผลิตภัณฑ์ ดำเนินการติดฉลากโดยใช้เครื่องติดฉลากอัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้ฉลากถูกติดอย่างถูกต้อง ตรงตำแหน่ง และมีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความน่าเชื่อถือและได้มาตรฐานเชิงพาณิชย์ พร้อมลดข้อผิดพลาดจากกระบวนการแบบใช้แรงงานคน ดังรูปที่ 3(ฉ)



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดลองทำผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า (มายิมมิม “My Mimmi”)

ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าที่พัฒนาขึ้นภายใต้ชื่อยี่ห้อ “My Mimm” มีการบรรจุในหลอดพลาสติกขนาด 30, 50 และ 100 กรัม ดังรูปที่ 3(ข) โดยมีส่วนผสมหลักเป็นผงถ่านกัลลาแมคคาเดเมียชาร์โคล ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตและแปรรูปแมคคาเดเมีย อันเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวมวลและสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางเชิงนวัตกรรม

2.4 การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า

2.4.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทำการวัดค่า pH โดยใช้เครื่องวัด pH meter ซึ่งได้ทำการสอบเทียบก่อนการวัดด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน เพื่อให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยทำการวัดหลังจากวางทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ และเมื่อครบ 1 เดือน เพื่อประเมินความคงตัวของค่าความเป็นกรด-ด่างของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาเบื้องต้น ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งในแต่ละช่วงเวลา และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย [12,13]

2.4.2 ค่าแรงตึงผิว

เตรียมตัวอย่างโฟมล้างหน้าที่ต้องการทดสอบ และเจือจางด้วยน้ำกลั่นตามอัตราส่วนที่กำหนด (เช่น 1:10) เพื่อให้เหมาะสมกับการวัด ทำการเทสารละลายลงในภาชนะของเครื่องวัดแรงตึงผิว แล้วทำการปรับวงแหวนโลหะให้สัมผัสกับผิวของของเหลวอย่างพอดี และดึงวงแหวนขึ้นในแนวตั้ง เครื่องจะบันทึกค่าแรง (F) ที่ใช้ในการดึง [14] แทนค่าคำนวณหาแรงตึงผิวในสมการที่ 1

$$\gamma = \frac{F}{2\pi R} \quad (1)$$

โดยที่

γ = แรงตึงผิว (mN/m)

F = แรงที่ใช้ดึง (N)

R = รัศมีของวงแหวน

2.4.3 ประสิทธิภาพการทำความสะอาด (%)

ในการทดสอบโดยใช้ปริมาณผลิตภัณฑ์คงที่ ได้ทำการควบคุมปัจจัยด้านเวลาและแรงถู ระยะเวลา จำนวนรอบในการถู และทิศทางในการถูเท่ากันทุกครั้ง แรงที่ใช้ในการถูในระดับ

ปานกลางและดำเนินการโดยผู้ทดสอบคนเดียวกันตลอดการทดลอง เพื่อลดความแปรปรวนที่อาจเกิดจากความแตกต่างของแรงถูในแต่ละบุคคล เตรียมแผ่นทดสอบและชั่งน้ำหนักเริ่มต้น ทำการทาสีสกรปรกจำลอง (น้ำมัน) ลงบนพื้นผิว และชั่งน้ำหนักเป็นค่า w_1 หลังจากนั้นใช้โฟมล้างหน้าปริมาณที่กำหนดแล้วล้างพื้นผิวภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน (เวลา/แรงถู) และล้างด้วยน้ำสะอาดและทำให้แห้ง ทำการชั่งน้ำหนักหลังล้างเป็นค่า w_2 [15] แทนค่าคำนวณหาความสะอาดในสมการที่ 2

$$Cleansing\ Efficiency\ (\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

W_1 = น้ำหนักสกรปรกก่อนล้าง

W_2 = น้ำหนักสกรปรกหลังล้าง

2.5 การทดลองใช้ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าในอาสาสมัคร

งานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองในอาสาสมัครหลังจากคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมที่สุดจากขั้นตอนการทดลองแบบ 3×5 full factorial design แล้ว จึงนำสูตรดังกล่าวไปประเมินในอาสาสมัคร เพื่อยืนยันความเหมาะสมในการใช้งานจริงด้านการระคายเคืองผิว ความปลอดภัยเบื้องต้น และความพึงพอใจของผู้ใช้ ภายใต้การรับรองด้านจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ โดยได้รับอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ หมายเลขรับรอง COA No.012/2025 และ PCR-REC No.015/68 การทดลองใช้ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าถูกออกแบบเพื่อประเมินความปลอดภัยต่อผิวหนังและความเหมาะสมในการใช้งานจริง โดยยึดหลักการคุ้มครองสิทธิ ความเป็นส่วนตัว และสวัสดิภาพของอาสาสมัครตลอดกระบวนการวิจัย

2.5.1 การหาค่าการระคายเคือง

ทำความสะอาดบริเวณผิวหนัง (ท้องแขนด้านใน) ทาผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่กำหนดลงบนแผ่นปิดผิว ปิดทับบริเวณผิวหนังเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เปิดแผ่นทดสอบและประเมินอาการที่ 12 และ 24 ชั่วโมง ให้คะแนนระดับ Erythema (ความแดง) และ Edema (การบวม) ตามเกณฑ์มาตรฐาน แทนค่าคำนวณหาการระคายเคืองในสมการที่ 3 [16]

$$PII = \frac{\sum(Erythema + Edema)}{n} \quad (3)$$

โดยที่ Erythema = ค่าความแดง
Edema = ค่าการบวม
n = จำนวนตัวอย่าง

2.5.2 ขั้นตอนการทดสอบการระคายเคืองผิว

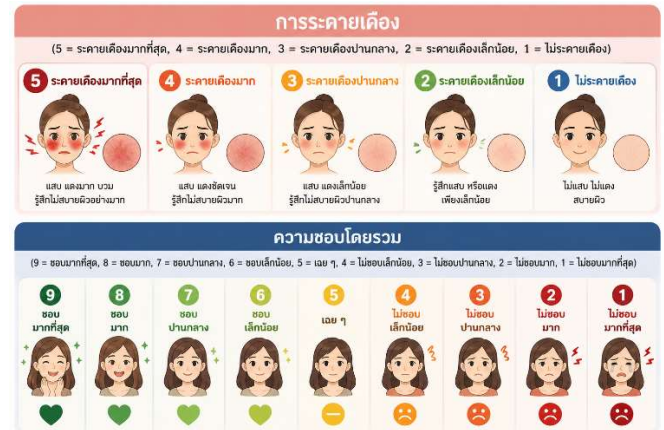
1) สัมภาษณ์เกี่ยวกับข้อมูลทั่วไป เช่น อายุ เพศ น้ำหนัก ส่วนสูง และการใช้โฟมล้างหน้าชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านมามีคุณสมบัติตามเกณฑ์คัดเข้าและเกณฑ์การคัดออก คือ เป็นกลุ่มอาสาสมัครที่มีอายุ 18 ปีขึ้นไป จำนวน 40 คน ดังนี้ วัยรุ่นจำนวน 20 คน (หญิง 10 คน ชาย 10 คน) อายุ 18-25 ปี ทำงานจำนวน 20 คน (หญิง 10 คน ชาย 10 คน) อายุ 26-35 ปี ที่รักสุขภาพ ความสวยงาม ไม่มีโรคประจำตัว เคยใช้ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าประเภทต่าง ๆ มาก่อน

การกำหนดคุณสมบัติและจำนวนของผู้ร่วมทดสอบอ้างอิงตามหลักจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ กำหนดช่วงอายุของอาสาสมัครระหว่าง 18-35 ปี เนื่องจากเป็นช่วงวัยที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวเป็นประจำ และเป็นช่วงวัยที่ระบบการทำงานของต่อมไขมันและสภาพผิวยังคงมีความแตกต่างอย่างชัดเจน กำหนดเพศในสัดส่วนเท่ากันเพื่อลดอคติของข้อมูล และเพิ่มความสามารถในการอ้างอิงผลการทดลองไปยังกลุ่มผู้บริโภคทั่วไป เนื่องจากสภาพผิว การผลิตน้ำมัน และการตอบสนองต่อผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิวมีความแตกต่างกันตามเพศ

2) สัมภาษณ์เกี่ยวกับอาการแพ้และผลข้างเคียง เมื่อได้ใช้ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านมามีผิวบริเวณใบหน้าปกติ ไม่แพ้ ไม่คัน ไม่มีผื่น สิว หรือการอักเสบของผิวหนัง สามารถปฏิบัติตามขั้นตอนและเข้าร่วมการวิจัยจนครบถ้วนตามกำหนด ไม่มีความผิดปกติของผิวหนัง ได้แก่ ผิวอักเสบ ผิวติด เชื้อ ผิวไวต่อการระคายเคือง ตั้งครรภ์ หรืออยู่ในระหว่างให้นมบุตร ไม่เคยเข้าร่วมการวิจัยหรือทดสอบผลิตภัณฑ์ทางผิวหนังอื่น ๆ ในช่วง 1 เดือนที่ผ่านมา

3) การทำแบบทดสอบการระคายเคืองด้วยวิธีการให้สเกล 5 Point และทำการประเมินคะแนนความชอบโดยรวมใช้วิธีการให้สเกล 9 Point (Hedonic scaling) โดยการสุ่มตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าทางสถิติ โดยทำการทดสอบแบบ single application open epicutaneous test [16]

โดยการนำผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าที่ไม่ต้องเจือจางกับน้ำทาบริเวณท้องแขนหรือหลัง ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เมื่อมีอาการระคายเคืองจะรู้สึกแสบ คัน มีรอยแดงเกิดขึ้น ภายใน 1 - 12 ชั่วโมง (การแพ้จะเกิดขึ้นภายใน 48 - 72 ชั่วโมง) หลังจากนั้นทำการให้คะแนนผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เกณฑ์การให้คะแนนทดสอบโฟมล้างหน้า

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า

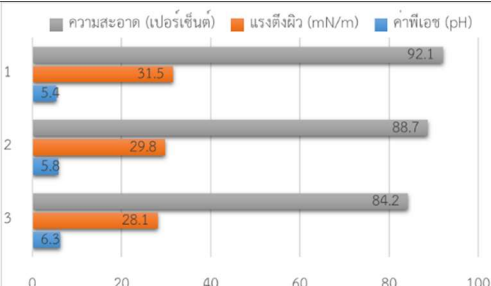
จากตารางที่ 2 เป็นผลจากการใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ขนาดผงถ่าน 0.05 มิลลิเมตร ให้ค่า pH ต่ำที่สุดที่ 5.4 อยู่ในช่วงอ่อนโยนต่อผิว (4.5-6.5) แรงตึงผิวสูงสุดที่ 31.5 mN/m ช่วยให้ฟองกระจายตัวและสามารถดูดซับสิ่งสกปรกได้ดี ความสะอาดสูงที่สุดที่ 92.1% แสดงให้เห็นว่าผงขนาดเล็กมี พื้นที่ผิวจำเพาะสูง สามารถซึมเข้าสู่รูขุมขนเล็ก ๆ และดูดซับสิ่งสกปรกได้มาก ขณะที่ขนาดผงถ่าน 0.15 มิลลิเมตร มี pH สูงขึ้น (6.3) แรงตึงผิวลดลง (28.1 mN/m) และความสะอาดต่ำสุด (84.2%) ซึ่งบ่งชี้ว่าผงใหญ่มีพื้นที่ผิวน้อยและอาจเสียดสีต่อผิวเพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 3 เป็นผลจากการใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ขนาดผงถ่าน 0.05 มิลลิเมตร ให้ความสะอาดสูงที่สุดถึง 94.8% และค่า pH 5.3 ยังคงอ่อนโยนต่อผิว แรงตึงผิวลดลงเล็กน้อยเป็น 30.2 mN/m แต่ยังคงอยู่ในช่วงเหมาะสม การเพิ่มปริมาณผงทำให้การดูดซับสิ่งสกปรกมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนขนาดผงถ่าน 0.15

มิลลิเมตร มีค่า pH 6.1 แรงตึงผิว 26.9 mN/m และความสะอาดลดลงเหลือ 86% แสดงให้เห็นว่า การใช้ผงขนาดใหญ่ แม้เพิ่มปริมาณก็ไม่สามารถชดเชยพื้นที่ผิวจำเพาะที่น้อยลงได้

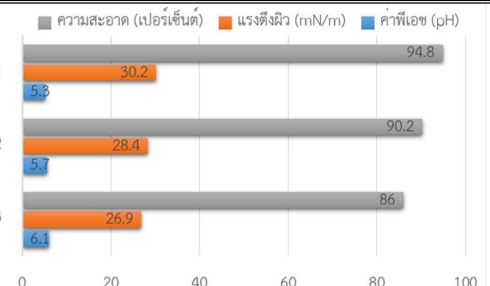
ตารางที่ 2 ผลการทดลองโดยใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

ที่	ขนาดผง (มิลลิเมตร)	ค่าพีเอช (pH) $\pm$ SD	แรงตึงผิว (mN/m) $\pm$ SD	ความสะอาด (%) $\pm$ SD	สรุป คุณภาพ
1	0.05	5.4 $\pm$ 0.02 ^a	31.5 $\pm$ 0.20 ^a	92.1 $\pm$ 0.35 ^a	ดีที่สุด
2	0.10	5.8 $\pm$ 0.03 ^b	29.8 $\pm$ 0.16 ^b	88.7 $\pm$ 0.40 ^b	ดี
3	0.15	6.3 $\pm$ 0.04 ^c	28.1 $\pm$ 0.18 ^c	84.2 $\pm$ 0.38 ^c	พอใช้



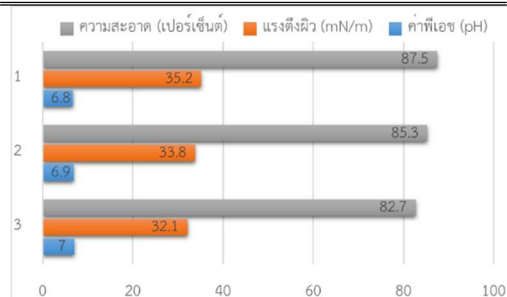
ตารางที่ 3 ผลการทดลองโดยใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

ที่	ขนาดผง (มิลลิเมตร)	ค่าพีเอช (pH) $\pm$ SD	แรงตึงผิว (mN/m) $\pm$ SD	ความสะอาด (%) $\pm$ SD	สรุป คุณภาพ
1	0.05	5.3 $\pm$ 0.02 ^a	30.2 $\pm$ 0.15 ^a	94.8 $\pm$ 0.30 ^a	ดีที่สุด
2	0.10	5.7 $\pm$ 0.03 ^b	28.4 $\pm$ 0.18 ^b	90.2 $\pm$ 0.42 ^b	ดี
3	0.15	6.1 $\pm$ 0.04 ^c	26.9 $\pm$ 0.20 ^c	86.0 $\pm$ 0.36 ^c	พอใช้



ตารางที่ 4 ผลการทดลองโดยใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

ที่	ขนาดผง (มิลลิเมตร)	ค่าพีเอช (pH) $\pm$ SD	แรงตึงผิว (mN/m) $\pm$ SD	ความสะอาด (%) $\pm$ SD	สรุปคุณภาพ
1	0.05	6.8 $\pm$ 0.03 ^a	35.2 $\pm$ 0.22 ^a	87.5 $\pm$ 0.40 ^a	ตัด (pH > 6.5, แรงตึงผิว > 35)
2	0.10	6.9 $\pm$ 0.04 ^b	33.8 $\pm$ 0.18 ^b	85.3 $\pm$ 0.38 ^b	ตัด (pH > 6.5)
3	0.15	7.0 $\pm$ 0.05 ^c	32.1 $\pm$ 0.20 ^c	82.7 $\pm$ 0.35 ^c	ตัด (pH > 6.5)



จากตารางที่ 4 เป็นผลจากการใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่า ขนาดผงถ่าน 0.05 มม. มีค่า pH สูงขึ้นเป็น 6.8 ซึ่งใกล้เคียงกับของช่วงอ่อนโยนต่อผิว แรงตึงผิวสูง 35.2 mN/m และความสะอาดลดลงเหลือ 87.5% แม้จะใช้ปริมาณมาก แต่เกิด การรวมตัวของผง (particle aggregation) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลงและการดูดซับสิ่งสกปรกลดลง ขณะที่ขนาดผงถ่าน 0.15 มิลลิเมตร มีค่า pH 7.0 เกินช่วงเหมาะสมต่อผิว และความสะอาดต่ำสุด 82.7% แสดงว่าการเพิ่มปริมาณเกินจำเป็นไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

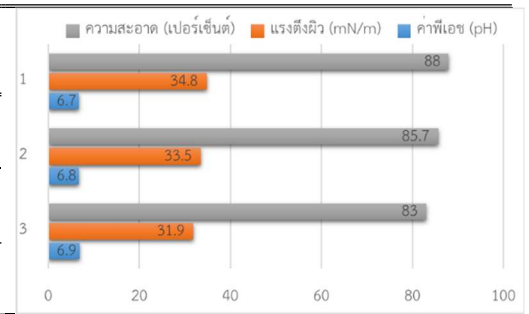
จากตารางที่ 5 เป็นผลจากการใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่าผลลัพธ์คล้ายกับปริมาณการผสมผงถ่านที่ 30 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ขนาดผงถ่าน 0.05 มิลลิเมตร ค่า pH 6.7 แรงตึงผิว 34.8 mN/m ความสะอาด 88% ขณะที่ขนาดผงถ่าน 0.15 มม. ค่า pH 6.9 แรงตึงผิวลดลงเหลือ 31.9 mN/m และความสะอาดลดลง 83% แสดงว่าการเพิ่มปริมาณการผสมผงถ่านเกิน 30-40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ไม่ช่วยเพิ่มความสะอาดและอาจทำให้ pH สูงเกินไป

จากตารางที่ 6 เป็นผลจากการใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดผงถ่าน 0.05 มิลลิเมตร ค่า pH 6.7 แรงตึงผิว 34.5 mN/m ความสะอาด 88.3% คล้ายกับปริมาณการผสมผงถ่านที่ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ

ขนาดผงถ่าน 0.15 มม. มีค่า pH 6.9 แรงตึงผิว 31.7 mN/m ความสะอาด 82.9% แสดงว่า การเพิ่มปริมาณผงมากเกินไปไม่ช่วยเพิ่มความสะอาดและค่า pH ยังสูงขึ้นใกล้เคียงที่ไม่เหมาะสมกับผิวบอบบาง

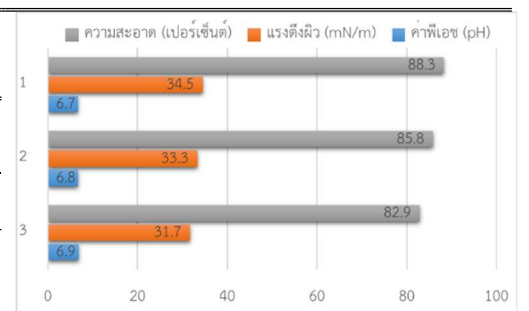
ตารางที่ 5 ผลการทดลองโดยใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ที่	ขนาดผง (มิลลิเมตร)	ค่าพีเอช (pH) $\pm$ SD	แรงตึงผิว (mN/m) $\pm$ SD	ความสะอาด (%) $\pm$ SD	สรุปคุณภาพ
1	0.05	6.7 $\pm$ 0.03 ^a	34.8 $\pm$ 0.20 ^a	88.0 $\pm$ 0.42 ^a	ตัด (pH > 6.5)
2	0.10	6.8 $\pm$ 0.04 ^b	33.5 $\pm$ 0.18 ^b	85.7 $\pm$ 0.36 ^b	ตัด (pH > 6.5)
3	0.15	6.9 $\pm$ 0.04 ^c	31.9 $\pm$ 0.20 ^c	83.0 $\pm$ 0.38 ^c	ตัด (pH > 6.5)



ตารางที่ 6 ผลการทดลองโดยใช้ปริมาณผงถ่านชาร์โคล 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ที่	ขนาดผง (มิลลิเมตร)	ค่าพีเอช (pH) $\pm$ SD	แรงตึงผิว (mN/m) $\pm$ SD	ความสะอาด (%) $\pm$ SD	สรุปคุณภาพ
1	0.05	6.7 $\pm$ 0.02 ^a	34.5 $\pm$ 0.18 ^a	88.3 $\pm$ 0.40 ^a	ตัด (pH > 6.5)
2	0.10	6.8 $\pm$ 0.03 ^b	33.3 $\pm$ 0.16 ^b	85.8 $\pm$ 0.35 ^b	ตัด (pH > 6.5)
3	0.15	6.9 $\pm$ 0.04 ^c	31.7 $\pm$ 0.18 ^c	82.9 $\pm$ 0.37 ^c	ตัด (pH > 6.5)



จากผลการทดลองดังตารางที่ 7 พบว่า ขนาดอนุภาคของผงถ่านและปริมาณการเติมผงถ่านมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า ทั้งค่า pH ค่าแรงตึงผิว และประสิทธิภาพการทำความสะอาด โดยผลการทดลองแสดงแนวโน้มว่าขนาดของผงถ่านและปริมาณการเติมผงถ่านมีผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า ทั้งค่า pH ค่าแรงตึงผิว และประสิทธิภาพการทำความสะอาด โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงของขนาดผงถ่านและปริมาณการเติมส่งผลต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน และในทางกลับกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ พบว่า ขนาดผงถ่าน 0.05 มิลลิเมตร ให้ค่าความสะอาดสูงกว่าขนาดผงถ่าน 0.10 มิลลิเมตร เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ทำให้สามารถดูดซับน้ำมัน สิ่งสกปรก และสารตกค้างบนผิวได้ดีกว่า ส่งผลให้สูตรที่ใช้ผงถ่านขนาด 0.05 มิลลิเมตร มีค่าความสะอาดสูงที่สุดที่ 94.8% ขณะเดียวกันยังคงรักษาค่า pH ให้อยู่ในช่วงอ่อนโยนต่อผิว (5.3 ± 0.02)

ในด้านปริมาณการเติมผงถ่าน พบว่า การเพิ่มปริมาณผงถ่านจาก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำทำความสะอาด เนื่องจากมีพื้นที่ดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสะอาดเพิ่มจาก 92.1% เป็น 94.8% อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มปริมาณผงถ่านมากเกินไป จะทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค (particle aggregation) ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง รวมถึงอาจรบกวนสมดุลของสารลดแรงตึงผิวในสูตร ทำให้ประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้ค่าแรงตึงผิวที่ระดับ 30.2 ± 0.15 mN/m ของสูตรปริมาณการผสมผงถ่าน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และขนาดผงถ่าน 0.05 มิลลิเมตร ยังแสดงถึงความสามารถในการกระจายตัวและจับสิ่งสกปรกได้ดี ส่งผลให้สูตรดังกล่าวมีความสมดุลทั้งด้านประสิทธิภาพการทำความสะอาดและความอ่อนโยนต่อผิวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ขนาดอนุภาคขนาดเล็กและปริมาณผงถ่านในระดับเหมาะสมมีความสัมพันธ์ร่วมกันต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า

ตารางที่ 7 ผลจากการทดลองสูตรโฟมล้างหน้าที่เหมาะสมที่สุด

ปริมาณผงถ่าน (กรัม)	ขนาดผงถ่าน (มม.)	ค่าพีเอช (pH) $\pm$ SD	แรงตึงผิว (mN/m) $\pm$ SD	ความสะอาด (%) $\pm$ SD	สรุปคุณภาพ
20	0.05	5.3 ± 0.02^a	30.2 ± 0.15^a	94.8 ± 0.30^a	ดีที่สุด
20	0.10	5.7 ± 0.03^b	28.4 ± 0.18^b	90.2 ± 0.42^b	ดี
10	0.05	5.4 ± 0.02^a	31.5 ± 0.20^c	92.1 ± 0.35^c	ดี
10	0.10	5.8 ± 0.04^c	29.8 ± 0.16^d	88.7 ± 0.40^d	พอใช้

3.2 ผลจากการทดลองใช้ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าในอาสาสมัคร

จากการทดลองในตารางที่ 8 จะเห็นว่าแนวโน้มของการระคายเคือง และความชอบโดยรวม ของอาสาสมัครภายใต้การทดสอบแบบ Single application open epicutaneous test พบว่า ในช่วง 2-4 ชั่วโมงแรก พบว่าค่าการระคายเคืองอยู่ที่ระดับ 1.5 (ระคายเคืองเล็กน้อย) ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทดสอบทางผิวหนังที่ระบุว่า ผิวอาจมีปฏิกิริยาเริ่มต้น (initial response) ต่อสารใหม่ เช่น อาการแสบหรือแดงเล็กน้อยจากการสัมผัสสารลดแรงตึงผิว อย่างไรก็ตาม ค่าดังกล่าวยังอยู่ในระดับต่ำและไม่เกินเกณฑ์ที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อผิว เมื่อ

พิจารณาในช่วง 6-12 ชั่วโมง พบว่าการระคายเคืองลดลงสู่ระดับ 0.6-1.2 (ระคายเคืองน้อยมากหรือไม่ระคายเคือง) อย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าอาการระคายเคืองที่เกิดขึ้นในระยะแรกเป็นเพียง การตอบสนองชั่วคราวของผิว (transient irritation) และผิวสามารถปรับสมดุลและฟื้นตัวได้เอง ซึ่งเป็นลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนโยนและมีค่า pH เหมาะสมใกล้เคียงผิวหนัง ในทางตรงกันข้าม ความชอบโดยรวม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 7.8 ในช่วง 2 ชั่วโมง เป็น 8.2 ในช่วง 12 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป ผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์มากขึ้น โดยเฉพาะหลังจากที่อาการระคายเคืองลดลง

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการระคายเคืองและความชอบโดยรวมรายชั่วโมง

คุณลักษณะ	ทดสอบการใช้ผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้า					
	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง
การระคายเคือง (1-5)	1.5 (เล็กน้อย)	1.5 (เล็กน้อย)	1.2 (เล็กน้อย)	1 (น้อยมาก)	0.8 (น้อยมาก)	0.6 (น้อยมาก)
ความชอบโดยรวม (1-9)	7.8	7.9	8.0	8.0	8.1	8.2

4. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาผลิตภัณฑ์โฟมล้างหน้าจากถ่านชาร์โคลกะลาแมคคาเดเมีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ขนาดผงถ่าน (0.05, 0.10 และ 0.15 มิลลิเมตร) และ ปริมาณการผสมผงถ่าน (10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ภายใต้การออกแบบการทดลองแบบ 3×5 full factorial design ผลการทดลองพบว่า ขนาดผงถ่านและปริมาณการผสม รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์ ซึ่ง

สะท้อนว่าประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงอย่างเดียว ผงถ่านขนาด 0.05 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ส่งผลให้สามารถดูดซับสิ่งสกปรกและน้ำมันได้ดี [17, 18] โดยถ่านชาร์โคลมีโครงสร้างรูพรุนที่ประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ ซึ่งเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ และจำนวนตำแหน่งยึดเกาะสำหรับจับโมเลกุลของไขมันที่เป็นการดูดซับเชิงกายภาพ ขณะเดียวกันยังมีการระคายเคืองต่ำ เนื่องจากอนุภาคมีความละเอียดและไม่ก่อให้เกิดการเสียดสีต่อผิว ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวัสดุคาร์บอนรูพรุนที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

[1, 2, 4] อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดผงเพิ่มขึ้น พบว่าความสะอาดลดลงและมีแนวโน้มเพิ่มการระคายเคือง สะท้อนถึงผลกระทบของลักษณะทางกายภาพของอนุภาคต่อผิวหนังโดยตรง [10]

ผลการทดสอบด้านปริมาณการผสม พบว่า ปริมาณส่วนผสมผงถ่านที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อผิว (ประมาณ 5.3) ค่าแรงตึงผิวอยู่ในช่วงที่มีประสิทธิภาพ (25–35 mN/m) และให้ค่าความสะอาดสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่สูงขึ้น พบว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการทำความสะอาดลดลง [13] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการรวมตัวของอนุภาคถ่าน (agglomeration) ที่ทำให้พื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพลดลง และส่งผลต่อการกระจายตัวในระบบโฟม อีกทั้งการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคยังอาจทำให้เกิดการทับซ้อนของโครงสร้างรูพรุน และลดเสถียรภาพของฟอง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการชะล้างบริเวณผิว

ผลการประเมินในอาสาสมัครของสูตรที่คัดเลือกแล้ว พบว่าการระคายเคืองอยู่ในระดับต่ำและลดลงตามเวลา แสดงถึงความอ่อนโยนของผลิตภัณฑ์ต่อผิวหนัง ขณะเดียวกันความชอบโดยรวมอยู่ในระดับสูงและเพิ่มขึ้นตามเวลา สะท้อนว่าผู้รับรูถึงประสิทธิภาพการทำความสะอาดและความสบายผิวหลังการใช้ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงผกผันระหว่างการระคายเคืองและความพึงพอใจของผู้บริโภค [15, 16] ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลมีพื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างรูพรุนที่มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว เมื่อพิจารณาผลทั้งหมดร่วมกันสามารถสรุปได้ว่าสูตรที่ใช้ผงถ่านขนาด 0.05 มิลลิเมตร ปริมาณส่วนผสมผงถ่านที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ผลที่ดีที่สุดระหว่างประสิทธิภาพการทำความสะอาด ความอ่อนโยนต่อผิว และการยอมรับของผู้ใช้งาน

5. ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาคุณสมบัติเชิงลึกของถ่านกะลาแมคคาเดเมีย เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างรูพรุน เพื่ออธิบายกลไกการดูดซับให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

2. ควรทดสอบผลิตภัณฑ์ในระยะยาวและในกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลาย เช่น ผิวมัน ผิวแห้ง และผิวแพ้ง่าย

3. ควรศึกษาความคงตัวของผลิตภัณฑ์ อายุการเก็บรักษา และบรรจุภัณฑ์ เพื่อรองรับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

4. ควรวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและความเป็นไปได้เชิงพาณิชย์ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่ตลาด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัย Fundamental Fund (FF) ประจำปีงบประมาณ 2568 เป็นงบประมาณฐานรากที่สนับสนุนโดยกองทุน ววน.กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ที่มีศักยภาพครั้งนี้ รวมไปถึงสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัย วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และขอขอบพระคุณวิสาหกิจชุมชนกลุ่มสมุนไพรเพื่อสุขภาพเขาค้อ (ชญาณิน) ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผู้ผลิตและแปรรูปแมคคาเดเมียเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ให้ข้อมูลประกอบการวิจัย เพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนจนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sakdapipanich J. Macadamia charcoal for health. Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University; 2007 [cited 2026 Mar 20]. Available from: <https://mgronline.com/science/detail/9500000136291>
- [2] Yothawong K, Singngao L, Pongpatrakant W. Preparation of activated carbon from macadamia nut shells by sodium chloride. In: *Proceedings of the 1st National Conference on Science,*

- Technology, and Innovation*; 2019 Apr; Loei, Thailand.
- [3] Sajjad M, Sarwar R, Ali T, Khan L, Mahmood SU. Cosmetic uses of activated charcoal. *International Journal of Community Medicine and Public Health*. 2021;8(9):4572–4574. doi:10.18203/2394-6040.ijcmph20213569.
 - [4] Khruaphue T, Chanpahol A, Srisawad S, Thiakthum S, Rienglard P. Development of exfoliating products from macadamia shell scraps for the community enterprise of Khao Kho macadamia producer and processing group, Phetchabun province. *Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University*. 2021;2(5):57–69.
 - [5] Ghodke AP, Kale VR, Bhise VV. Formulation and evaluation of polyherbal facial scrub. *International Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2024;2(6):634–643.
 - [6] Samosorn B, Wongwatthanaphong K. Guidelines for managing agricultural waste project. *Journal of Modern Learning Development*. 2024;9(9):628–641.
 - [7] Tripetchkul S, Pundee K, Akeprathumchai S. Utilization of by-products derived from the virgin coconut oil manufacturing process for soap preparation. *KMUTT Research and Development Journal*. 2013;36(4):439–450.
 - [8] Nadondu B, Khruaphue T, Thipwong S, Dhinnabutra P, Chuenchomnakjad S. Development of an absorbing brick using macadamia shell charcoal powder. *Journal of Industrial Technology*. 2024;20(3):1–12. doi:10.14416/j.ind.tech.2024.12.005.
 - [9] Youme P. Preparation of activated carbons with high surface area from wood charcoal powder by dry chemical activation. *KKU Science Journal*. 2015;43(4):788–798.
 - [10] Fukuda IM, Pinto CFF, Moreira CS, Saviano AM, Lourenço FR. Design of experiments (DoE) applied to pharmaceutical and analytical quality by design (QbD). *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2018;54:e01006. doi:10.1590/S2175-97902018000001006.
 - [11] Klinkesonkanit S, Worawimut M. Flue gas torrefaction for solid shell biomass. *Journal of Engineering and Innovation*. 2022;15(3):92–104.
 - [12] Puteh R, Lateh R, Marde W, Noipha K. Development of facial cleansing gel containing Tri-kanpis remedy extract. *Thai Science and Technology Journal*. 2023;31(6):90–109. doi:10.14456/tstj.2023.71.
 - [13] Thitiwongsawet P, Wongjanla S, Jandawong W. Antibacterial soaps containing the crude extracts of *Phyllanthus emblica* Linn. *Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology*. 2016;8(15):1–13.
 - [14] Omee P. Evaluation of surface tension and critical micelle concentration of surfactants using the pendant drop method captured with a smartphone. Research report. Chonburi: Faculty of Science, Burapha University; 2024.
 - [15] Khiewswai N. Development of polymer-based hydrogels with cellulose fiber extraction from sugarcane bagasse for food and environmental application. Research report. Pathum Thani: Faculty of Science and Technology, Thammasat University; 2023.
 - [16] Yamsaard T, Tobngam K, Boonyareth M, Sangkijporn S. Primary skin irritation test in laboratory animals for health products. *Bulletin of the Department of Medical Sciences*. 2016;58(1):130–140. (in Thai)
 - [17] Pungpai P, Watankornsiri A, Kangkun N. Comparison of absorptive efficiency of oil spill dispersants using naturally nano-technologically porous materials. *Koch Cha Sarn Journal of Science*. 2018;40(1):38–49. (in Thai)
 - [18] Donchuprai S, Thungthong R, Laowongkhot W, Lertkao P, Discharoen N, Promma T.

Comparison of oil adsorption capacity and efficiency from corn husk and bamboo sheath. *Journal of Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University*. 2013;15(21):137–148.