

คุณสมบัติของถ่านจากกากกะลามะคาเดเมียเตรียม
โดยเตาประดิษฐ์ขนาดเล็ก

Properties of Macadamia Shell Charcoal Prepared
by a Small Artificial Furnace

ปิยรัตน์ มุลศรี^{1*}
Piyarut Moonsri^{1*}

ได้รับบทความ: 13 ต.ค. 2563

ได้รับบทความแก้ไข: 2 ธ.ค. 2563

ยอมรับตีพิมพ์: 16 ธ.ค. 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของถ่านจากกากกะลามะคาเดเมียเตรียมโดยเตาประดิษฐ์ขนาดเล็กถ่านกะลามะคาเดเมียจากเศษกะลามะคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตรมืองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและเถ้าอยู่ในสัดส่วนร้อยละ 28.9 30.5 40.3 และ 0.3 โดยน้ำหนักตามลำดับ การเตรียมถ่านกะลามะคาเดเมียโดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันของเศษกะลามะคาเดเมีย 3 กิโลกรัม ด้วยเตาเผาประดิษฐ์ขนาด 54 ลิตร ใช้ระยะเวลาตลอดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันน้อยกว่า 3 ชั่วโมง มีอุณหภูมิสูงสุดของการเผาในช่วง 400-500 °C ได้ผลผลิตเป็นถ่านกะลามะคาเดเมียคุณภาพดี คิดเป็นร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 40.7 ถ่านที่ได้มีลักษณะมันวาว มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 374.7 mg g⁻¹ ถ่านที่ได้มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.46 g cm⁻³ จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงประมาณพบว่า มีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณเถ้า ปริมาณความชื้น และปริมาณสารระเหยได้ อยู่ในสัดส่วนร้อยละ 83.2 6.3 4.3 และ 6.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานความร้อนสูง (HHV) ของถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาร์ลอร์มิเตอร์ มีค่าเท่ากับ 17.68 MJ kg⁻¹ (หรือ 4,223 kcal kg⁻¹)

คำสำคัญ : กะลามะคาเดเมีย ถ่านกะลามะคาเดเมีย วัสดุเหลือทิ้ง

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์ 67000

¹ Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun 67000.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding author) e-mail: piyarutto@hotmail.com

ABSTRACT

The objective of this research was to study the properties of macadamia shell charcoal prepared in a small artificial furnace. The macadamia shell was agricultural sector waste. The constituents of macadamia shell were cellulose, hemicellulose, lignin and ash in the proportions of 28.9%, 30.5%, 40.3%, and 0.3% by weight, respectively. After the carbonization of 3 kilograms of macadamia shell using a 54 liter-artificial furnace with the highest sintering temperature in the range of 400-500 °C for less than 3 hours, a good quality macadamia charcoal with a shiny surface was obtained with a moderated yield of 40.7%. The macadamia charcoal had electrical conductivity ability. It had a bulk density of 0.46 g cm⁻³, and had an iodine absorption coefficient value of 374.7 mg g⁻¹. The approximate analysis showed that the quantities of fixed carbon, ash, moisture, and volatile matters were in the proportions of 83.2%, 6.3%, 4.3%, and 6.2% by weight, respectively. In addition, the high heating value (HHV) of the macadamia shell charcoal when analyzed by a bomb calorimeter was 17.68 MJ kg⁻¹ (or 4,223 kcal kg⁻¹).

Keywords: Macadamia; Macadamia Charcoal; Waste material

บทนำ

มะคาเดเมีย (*Macadamia integrifolia*) เป็นพืชตระกูลนัทหรือถั่วเปลือกแข็ง ซึ่งเป็นพืชยืนต้น โดยถั่วมะคาเดเมียมีรสชาติอร่อย เมื่อผ่านการอบแล้วสามารถนำมารับประทานได้โดยตรงหรือนำไปแปรรูปเป็นส่วนผสมในอาหารต่าง ๆ มากมาย รวมไปถึงการแปรรูปนำไปใช้ในเครื่องสำอางค์บางชนิดได้ เป็นต้น มะคาเดเมียเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง มีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวในปริมาณสูงซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ กรดโอเลอิก (Oleic) และปาล์มิโตเลอิก (Palmitoleic) นอกจากนี้ยังพบแร่ธาตุ Mg, Zn, Cu และ Mn ซึ่งทำให้มีคุณค่าทางโภชนาการ มีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) และสารประกอบอัลฟาโทโคฟีรอล (α -tocopherol compound) ที่สามารถช่วยในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีอีกด้วย[1] ดังนั้นมะคาเดเมียจึงถือได้ว่าเป็นพืชที่มีประโยชน์อย่างมากทั้งในด้านการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม มีศักยภาพทางเศรษฐกิจ และมีความต้องการทางการตลาดของผู้บริโภคสูง สำหรับการปลูกพืชมะคาเดเมียในจังหวัดเพชรบูรณ์นั้น ทางภาครัฐบาลและจังหวัดได้มีการส่งเสริมให้เกษตรกรในพื้นที่สูงของจังหวัดโดยเฉพาะในเขตพื้นที่อำเภอเขาค้อ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีระดับความสูงและมีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปลูกมะคาเดเมีย ทำการปลูกมะคาเดเมียเพื่อเป็นพืชเศรษฐกิจของชุมชนสร้างรายได้และเป็นผลไม้ของท้องถิ่นขายให้กับนักท่องเที่ยวและผู้บริโภคที่ต้องการทั่วไป ในขั้นตอนของการผลิตเมล็ดมะคาเดเมียเพื่อจำหน่ายจะต้องมีการคัดเลือกหุ้มกะลาของผลมะคาเดเมียออกไปก่อน จากนั้นจึงทำการตากหรืออบแห้งแล้วจึงทำการกะเทาะกะลาผลมะคาเดเมียเพื่อเอาเมล็ดมะคาเดเมียออกจำหน่าย ดังนั้นในการกระบวนการผลิตเมล็ดมะคาเดเมีย จึงมีเปลือกหุ้มกะลาและกะลามะคาเดเมียเป็นผลพลอยได้เหลือทิ้งออกมาเป็นจำนวนมากที่ยังเป็นปัญหาในการกำจัดโดยการทิ้งออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือการเผาทำลายซึ่งสร้างมลพิษทางอากาศให้กับชุมชน

โดยทั่วไปแล้วเปลือกกะลาและของเสียอื่นๆ มีสัดส่วนอยู่เกือบร้อยละ 70 โดยน้ำหนักของผลมะคาเดเมีย เปลือกมะคาเดเมียจัดอยู่ในพวกลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) มีความหนา 1.5 มม. ถึง 5 มม. และ

ประกอบด้วยสองชั้นหลักคือไม้เนื้ออ่อนภายในชั้นและชั้นไม้เนื้อแข็งภายนอก โมดูลัสของความยืดหยุ่นของเปลือกมะคาเดเมียอยู่ภายในช่วง 4.2–5.2 GPa ความต้านทานแรงดึงของเปลือกมะคาเดเมียคือ 55 MPa มีความหนาแน่นรวม (Bulk density) อยู่ที่ 680 kg m^{-3} มีความชื้นประมาณ 10% และให้ค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วง 4,000–5,500 kcal kg^{-1} [2-4] ซึ่งจากสมบัติของเปลือกกะลามะคาเดเมียดังกล่าวจึงมักถูกนำไปบดเพื่อผลิตเป็นวัสดุอินทรีย์สำหรับการทำสวน ใช้คลุมดินในสวนผลไม้ ใช้ถมถนนและยังใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนจากการเผาไหม้แทนไม้ฟืน และสามารถใช้ผงของเปลือกกะลามะคาเดเมียเป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมผลิตไม้บอร์ดและในอุตสาหกรรมพลาสติกได้ [2, 5]

นอกจากนี้แล้วจากการที่ชีวมวลกะลามะคาเดเมียมีองค์ประกอบหลักเป็นลิกโนเซลลูโลสที่สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของถ่านกะลามะคาเดเมีย (Macadamia charcoal) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่มีปริมาณอากาศอย่างจำกัด ซึ่งจะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของ ก๊าซ ของเหลว และแก๊ส ซึ่งการย่อยสลายด้วยความร้อนนี้ทำที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150°C ขึ้นไป โดยใช้อากาศในปริมาณที่จำกัดโดยที่อุณหภูมิประมาณ $100\text{--}120^\circ\text{C}$ จะเป็นช่วงของการไล่ความชื้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 275°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาส่วนใหญ่จะเป็นแก๊ส เช่น แก๊ส CO , CO_2 และมีกรดน้ำส้มและเมทานอลถูกกลั่นออกมา ที่ช่วงอุณหภูมิ $280\text{--}350^\circ\text{C}$ สารที่มีองค์ประกอบทางเคมีซับซ้อนจะถูกกลั่นออกมา เช่น คีโตน (Ketone) แอลดีไฮด์ (Aldehydes) ฟีนอล (Phenol) และเอสเทอร์ (Ester) รวมทั้งแก๊สต่าง ๆ เช่น CO , CO_2 และ CH_4 และกระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization) ที่เกิดขึ้นอุณหภูมิสูงกว่า 350°C ซึ่งสารระเหยง่ายจะถูกกลั่นแยกออกมาและมีส่วนที่เหลือคือ ถ่าน (Charcoal) กับขี้เถ้า (Ash) เกิดขึ้น [6] ซึ่งถ่านชีวภาพ (Biochar) จากกะลามะคาเดเมียและถ่านคุณภาพสูง (ซึ่งผลิตโดยใช้วิธีการหรือเทคนิคเฉพาะ) สามารถนำไปใช้ทั้งเป็นวัสดุเชื้อเพลิง หรือใช้เป็นวัสดุผสมในการผลิตในวัสดุคอมโพสิตหลายชนิด เช่น พลาสติกคอมโพสิต (Composite plastic) สำหรับยานพาหนะ คอมโพสิตของไม้และพลาสติก (Wood-plastic composite) รวมถึงมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ และการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดโลหะหนัก ฟีนอล ไนเตรตและเมทานอล เป็นต้น [7-10]

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการแปรรูปกะลามะคาเดเมียซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งของกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกและแปรรูปมะคาเดเมีย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ให้เป็นถ่านกะลามะคาเดเมียโดยใช้เตาเผาประดิษฐ์ขนาดเล็กและศึกษาคุณสมบัติของถ่านกะลามะคาเดเมียที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาไปสู่ผลิตภัณฑ์ชุมชนจากถ่านกะลามะคาเดเมีย ซึ่งจะเป็นการช่วยลดปัญหาวัสดุเหลือทิ้งของกลุ่มเกษตรกร ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและช่วยเพิ่มมูลค่าของวัสดุกะลามะคาเดเมียเหลือทิ้งเหล่านั้นต่อไปได้

วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการศึกษาการแปรรูปเศษซากกะลามะคาเดเมียของกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกมะคาเดเมียในเขตอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยเตาเผาประดิษฐ์ขนาดเล็กและศึกษาคุณสมบัติของถ่านที่เตรียมได้

1. สารเคมีและการเตรียมตัวอย่าง

ในการวิจัยครั้งนี้สารเคมีที่ใช้เป็นสารเคมีระดับเกรดวิเคราะห์ (Analytical grade) และใช้น้ำกลั่นในการเตรียมสารละลายตลอดการทดลอง กะลามะคาเดเมียตัวอย่างได้มาจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกมะคาเดเมีย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบทำโดยการคัดแยกกะลามะคาเดเมียออกมาจากสิ่งสกปรกปนเปื้อนอื่น ๆ เช่น เศษเนื้อเมล็ดมะคาเดเมีย เศษหิน เศษดิน เป็นต้น จากนั้นนำไปผึ่ง

แดดให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นที่หลงเหลืออยู่ แล้วนำไปใส่ลงเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อเตรียมนำไปใช้งานต่อไป

2. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของกะลามะคาเดเมีย

ทำการศึกษาก่อนองค์ประกอบของกะลามะคาเดเมียได้แก่ ปริมาณเซลลูโลสตามวิธีมาตรฐาน TAPPI T203 om-88[11] ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสโดยวิธี acid chlorite ของ Browning[12] ปริมาณเอมิเซลลูโลสหาได้จากผลต่างของปริมาณร้อยละของไฮโดรเซลลูโลสและเซลลูโลส ปริมาณลิกนินตามวิธีมาตรฐาน TAPPI T222 om-88[13] และปริมาณเถ้าตามวิธีมาตรฐาน TAPPI T211 om-02[14] โดยแต่ละการทดลองทำซ้ำไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมน้ำจากกะลามะคาเดเมีย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำจากเศษกากกะลามะคาเดเมีย เตรียมเตาสำหรับเผาถ่านขนาด 54 ลิตร นำกะลามะคาเดเมีย ปริมาณ 3 kg ใส่ลงไปในภาชนะบรรจุทรงกระบอก (ขนาด 14 cm x 54 cm) แล้วปิดฝา นำใส่ลงไปในเตาเผาเตา จากนั้นชั่งแกลบแห้งหนักประมาณ 1 kg ใส่ลงไปในเตารอบๆ ภาชนะบรรจุกะลามะคาเดเมีย จนเต็มเตา เปิดปั๊มดูดอากาศให้ไหลเข้าจากด้านล่างของเตา ผ่านชั้นแกลบขึ้นสู่ด้านบนของเตา จุดไฟเผาเชื้อเพลิงแกลบด้านบนเตา จนไฟติด จากนั้นทำการควบคุมการไหลเข้าของอากาศเพื่อให้ไฟติดแกลบโดยไม่เกิดการลุกไหม้เป็นเปลวไฟ แต่ให้ไฟติดโดยไม่ดับ จากนั้นนำฝาคกรอบเตาที่มีท่อนำควันออกปิดส่วนด้านบนของเตา จากนั้นคอยสังเกตลักษณะของควันไฟ และสีของควันเพื่อให้ทราบอยู่ในขั้นตอนใดของกระบวนการคาร์บอนเซชัน ในช่วงของการไล่ความชื้นลักษณะของควันไฟจะเป็นสีขาวเทาจาง ๆ เมื่อนำมือไปสัมผัสจะมีไอน้ำออกมาด้วย ในช่วงของการเกิดควันบ้างจะมีควันลักษณะสีขาวเกิดขึ้นจำนวนมากและเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นมาก และในช่วงของการเกิดถ่านควันมีลักษณะเป็นสีขาวใส (อ่านอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) โดยหากต้องการปรับเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาให้เพิ่มปริมาณอากาศให้ไหลเข้าเตาโดยการปรับเพิ่มความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นให้ทำการปล่อยให้กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นต่อไปอีกประมาณ 10 นาที แล้วจึงทำการปิดเตาโดยการปิดไม่ให้อากาศเข้าไปในเตาทั้งในส่วนของการดูดอากาศเข้าโดยเครื่องโบเวอร์ และปิดช่องนำควันออกด้านบนของท่อนำควันออกของฝารอบเตา ปล่อยให้กระบวนการเผาถ่านไหม้ภายในเตาดำเนินต่อไปเอง เมื่อกระบวนการเผาไหม้สิ้นสุดลงและอุณหภูมิของเตาลดลงจนอยู่ที่อุณหภูมิห้อง (โดยการทิ้งไว้ 1 คืน) ทำการเปิดฝเตา และนำถ่านกะลามะคาเดเมียที่ได้ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

การเตรียมน้ำจากกะลามะคาเดเมียทำโดยการลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบบอลมิลล์ โดยนำถ่านกะลามะคาเดเมียใส่ลงไปในโถบดเซรามิกประมาณ $\frac{3}{4}$ ของภาชนะ แล้วใส่ลูกบอลเซรามิกสัลงไป จากนั้นทำการปิดฝาภาชนะและนำไปตั้งทิ้งไว้บนเครื่องบดบอลมิลล์ เปิดเครื่องบอลมิลล์เพื่อให้งานและทิ้งไว้ในเกิดการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคนานประมาณ 30 นาที จากนั้นนำผงถ่านไปร่อนผ่านแร่งตะแกรงขนาด 8 เมท จากนั้นนำผงถ่านที่ได้ไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

4. การศึกษาสมบัติของถ่านกะลามะคาเดเมีย

การศึกษาลักษณะรูปร่าง (Morphology) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, model Phenom XL, Phenom-World, Netherland)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture) ดำเนินการโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173-95 ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter) ดำเนินการโดยวิธีมาตรฐาน ASTM D3175-95 การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า (Ash) ดำเนินการโดยวิธีมาตรฐาน

ASTM D3174-95 และการวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) คำนวณได้จากสมการที่ 1[6-7].

$$\text{Fixed Carbon (\%)} = 100 - \text{Ash\%} - \text{VM\%} \quad (1)$$

การวิเคราะห์หาสมบัติค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ของถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้ในแต่ละสถานะที่สามารถแสดงถึงสมบัติด้านพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ ทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D4607-94[15]

สำหรับการหาความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของถ่านกะลามะคาเดเมียทำโดยนำผงถ่านกะลามะคาเดเมียที่ได้หนักประมาณ 5 กรัม ไปอัดขึ้นรูปให้เป็นก้อนทรงกระบอกด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก จากนั้นนำไปวัดขนาดเพื่อคำนวณหาปริมาตรและนำไปชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง โดยความหนาแน่นของถ่านกะลามะคาเดเมียคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของถ่านที่ชั่งได้หารด้วยปริมาตรของก้อนถ่าน[6-7]

การหาค่าสมบัติเชิงความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมียตัวอย่างทำโดยการใช้เครื่องบอมบ์คาร์ลอร์มิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter, model Autobomb, Gallenkamp, UK) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 3D3286-77[7]

การทดสอบสภาพการนำไฟฟ้าของถ่านกะลามะคาเดเมียทำโดยใช่วิธีอย่างง่าย จากการใช้ไขควงทดสอบกระแสไฟฟ้าที่ต่อวงจรเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคือแบตเตอรี่ขนาดเล็กผ่านถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้

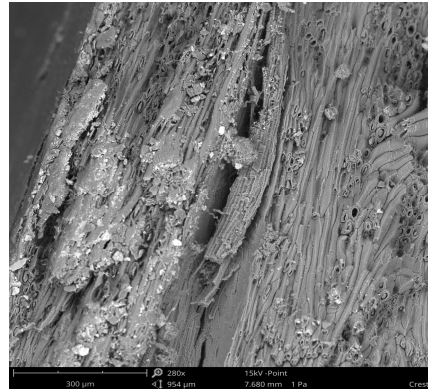
ผลการวิจัย

1. ลักษณะทางกายภาพและผลการศึกษาคู่ประกอบทางเคมีของเปลือกถ่านกะลามะคาเดเมีย

วัตถุดิบของถ่านกะลามะคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตร ซึ่งได้มีการจัดการวัตถุดิบเบื้องต้นโดยการคัดแยกสิ่งสกปรกและการนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้น โดยลักษณะของตัวอย่างถ่านกะลามะคาเดเมียที่ใช้ในการวิจัยนี้ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงได้ดังภาพที่ 1



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 ลักษณะของ (ก) กะลามะคาเดเมียเหลือทิ้งจากการเกษตร และ (ข) ลักษณะโครงสร้างของเปลือกกะลามะคาเดเมียที่ผ่านการถ่ายด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 280x

จากการศึกษาองค์ประกอบของกะลามะคาเดเมียได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณไฮโดรเซลลูโลส เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเถ้า ของกะลามะคาเดเมียตัวอย่าง

องค์ประกอบที่ศึกษา	ปริมาณ (%) ที่ตรวจพบ
ไฮโดรเซลลูโลส	59.42 ± 0.06
อัลฟาเซลลูโลส	28.94 ± 0.39
เฮมิเซลลูโลส	30.48 ± 0.37
ลิกนิน	40.26 ± 0.14
เถ้า	0.29 ± 0.12

จากผลที่ได้พบว่ากะลามะคาเดเมียมีองค์ประกอบที่ประกอบไปด้วยไฮโดรเซลลูโลสร้อยละ 59.4 มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 28.9 จึงทำให้มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 30.5 อีกทั้งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 40.3 และปริมาณเถ้าร้อยละ 0.3 ซึ่ง Wechsler et al.[2] ได้รายงานผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบอย่างง่ายในกะลามะคาเดเมียว่าประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 29.5 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 30.0 ลิกนินร้อยละ 40.1 และเถ้าร้อยละ 0.31 โดยพบว่าเมื่อตัวอย่างกะลามะคาเดเมียมีปริมาณของเซลลูโลสลดลงมากเท่าใดก็จะมีปริมาณของลิกนินมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุจากธรรมชาติที่เป็นกลุ่มของ Lignocellulosic material[2, 16]

2. ผลการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกะลามะคาเดเมีย

ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมถ่านจากกะลามะคาเดเมีย โดยใช้เตาประดิษฐ์ดังภาพที่ 2 ซึ่งมีขนาดของเตาสำหรับเผาขนาด 54 ลิตร และห้องเผาเป็นภาชนะทรงกระบอกมีฝาปิดเจาะรูขนาดเล็กด้านข้างมีปริมาตร 10 ลิตร สามารถเผากะลามะคาเดเมียได้ครั้งละ 3 kg ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแกลบ (แห้ง) หนักประมาณ 1 kg ใส่ลงไปในเตารอบ ภาชนะบรรจุกะลามะคาเดเมีย การเผาไหม้ของชีวมวล

เชื้อเพลิงจากด้านบนเตาลงด้านล่างเตาและป้อนอากาศจากล่างขึ้นด้านบนของเตาโดยใช้เครื่องเป่าลม (Blower) ที่ปรับระดับความเร็วของลมเข้าได้และใช้พลังงานจากแบตเตอรี่



ภาพที่ 2 ลักษณะของเตาประดิษฐ์สำหรับการเผาถ่านจากเศษกะลามะคาเดเมียที่ใช้ในการศึกษา

จากการศึกษาสภาวะในการเผากะลามะคาเดเมียให้กลายเป็นถ่านด้วยเตาประดิษฐ์นี้ ได้ทำการเผาที่สภาวะต่างกัน 3 สภาวะ จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลผ่านของอากาศเข้า (ปริมาตรที่อากาศไหลผ่านต่อหนึ่งหน่วยเวลา) ที่ $0.724 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ที่ $2.106 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ และที่ $2.538 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ของสภาวะที่ 1-3 ตามลำดับ ที่มีผลต่อระยะเวลาในช่วงต่าง ๆ ของกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล และอุณหภูมิของการคาร์บอนเซชันที่มีผลต่อการแปรสภาพเป็นถ่านกะลามะคาเดเมีย ผลที่ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการกะลามะคาเดเมียที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สภาวะของการเผา	ระยะเวลาช่วงไล่ความชื้น (นาท)	ระยะเวลาในการเกิดควันบ้ำ(นาท)	อุณหภูมิของการเผาให้เป็นถ่าน (°C)	การแปรสภาพเป็นถ่านกะลามะคาเดเมีย
1	130	72	300	เปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหมด
2	95	43	400	เปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหมด ถ่านที่ได้มีลักษณะมันวาว และนำไฟฟ้าได้
3	70	30	500	เปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหมด ถ่านที่ได้มีลักษณะมันวาว และนำไฟฟ้าได้ เกิดขี้เถ้าปนอยู่มาก

จากผลการทดลองดังตารางที่ 2 พบว่าการเผาที่ใช้อัตราการไหลผ่านของอากาศเข้าที่น้อยๆ จะใช้ระยะเวลาในการเผาของช่วงต่าง ๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสนานกว่าการใช้อัตราการไหลผ่านของอากาศที่มาก การเผาที่อุณหภูมิ 300 °C ก็เพียงพอที่จะทำให้กะลามะคาเดเมียกลายเป็นถ่านได้หมด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเผาเป็น 400 °C พบว่านอกจากกะลามะคาเดเมียเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหมดแล้ว ถ่านที่ได้มีลักษณะมันวาว และนำไฟฟ้าได้ และสภาพของถ่านกะลามะคาเดเมียที่ได้นี้ก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการเผาที่ 500 °C เช่นกัน แต่พบว่าจะเกิดเขม่าปนอยู่ในปริมาณมาก ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาให้เป็นถ่านของกะลามะคาเดเมีย สำหรับเตาประดิษฐ์นี้ จึงเลือกอุณหภูมิที่ 400 °C และมีอัตราการไหลเข้าของอากาศที่ระดับกลาง เป็นสภาวะของการเผาถ่านกะลามะคาเดเมีย

จากการศึกษาระยะเวลาในการปิดเตาหลังจากช่วงที่เกิดควันขาวของการเผาถ่านที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนเซชันประมาณ 400 °C (โดยการควบคุมอัตราการไหลเข้าของอากาศ) ที่มีผลต่อการแปรสภาพเป็นถ่านกะลามะคาเดเมีย น้ำหนักของถ่านที่ได้ ร้อยละของผลผลิตและค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกะลามะคาเดเมีย ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การแปรสภาพเป็นถ่าน น้ำหนักถ่านที่ได้ ร้อยละของผลผลิตและค่าการดูดซับไอโอดีน ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาในการปิดเตาหลังจากช่วงเกิดควันขาว

ระยะเวลาในการปิดเตา หลังจากช่วงเกิดควันขาว (นาทีก)	การแปรสภาพเป็น ถ่านกะลา มะคาเดเมีย	น้ำหนักของ ถ่านที่ได้ (kg)	ร้อยละของผลผลิต ถ่านที่ได้ (%)	ค่าการดูดซับ ไอโอดีน (mg g ⁻¹)
10	เกิดถ่านทั้งหมด	1.22	40.7	374.7
20	เกิดถ่านทั้งหมด และมีเศษเขม่า ปะปนบางส่วน	0.85	28.3	382.5
30	เกิดถ่านทั้งหมด และมีเศษเขม่า ปะปนมาก	0.64	21.3	394.2

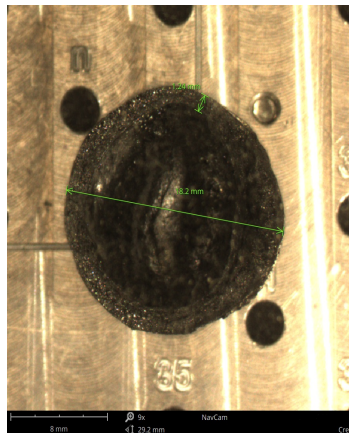
จากผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 3 พบว่าที่ระยะเวลาในการปิดเตาหลังจากช่วงการเกิดควันขาว 10 นาที จะได้ผลผลิตเป็นถ่านกะลามะคาเดเมียทั้งหมด มีน้ำหนักของถ่านที่ได้ปริมาณ 1.22 kg ซึ่งคิดเป็นร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 40.7 มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 374.7 mg g⁻¹ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 20 นาที พบว่าจะได้ผลผลิตเป็นถ่านกะลามะคาเดเมียทั้งหมดและมีเศษเขม่าปะปนบางส่วน ได้ร้อยละของผลผลิตเท่ากับร้อยละ 28.3 ถ่านที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 382.5 mg g⁻¹ และหากเพิ่มระยะเวลาเป็น 30 นาที พบว่าจะได้ผลผลิตเป็นถ่านกะลามะคาเดเมียทั้งหมดและมีเศษเขม่ามาก ได้ร้อยละของผลผลิตเท่ากับร้อยละ 21.3 ถ่านที่ได้มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 394.2 mg g⁻¹ ตามลำดับ ดังนั้นหากใช้ระยะเวลาในการปิดเตานานขึ้นจะทำให้ถ่านที่ได้มีเขม่าเกิดขึ้นมากและได้ปริมาณผลผลิตลดลง ดังนั้นการใช้ระยะเวลาในการปิดเตา 10 นาที จึงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเผาให้เป็นถ่าน

3. ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกะลามะคาเดเมีย

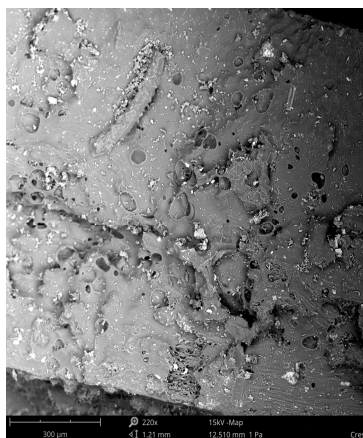
ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของถ่านกะลามะคาเดเมียที่ได้จากการเผาด้วยเตาประดิษฐ์ที่ได้แสดงดังภาพที่ 3 (ก) ซึ่งเป็นถ่านที่มีลักษณะสีดำมันวาว แข็ง มีน้ำหนักเบา เมื่อกระทบกันจะมีเสียงกังวาน มีปริมาณของเถ้าปนอยู่น้อย และเมื่อนำไปถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ลักษณะแสดงดังภาพที่ 3 (ข) และ (ค) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างของถ่านกะลามะคาเดเมียที่มีสภาพความพรุนสูง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3 ลักษณะของ (ก) ถ่านกะลามะคาเดเมีย และลักษณะโครงสร้างของถ่านกะลามะคาเดเมีย (ข) ที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 9x และ (ค) ที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยกำลังขยาย 220x

4. ผลการศึกษาองค์ประกอบอย่างง่าย ความหนาแน่นและสมบัติเชิงความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมีย จากการตรวจสอบองค์ประกอบอย่างง่ายของถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้โดยวิธีการวิเคราะห์ สมบัติแบบประมาณ (Proximate analysis) ทำโดยการหาปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตลอดจนสมบัติความหนาแน่นปรากฏ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านที่ได้จากกะลามะคาเดเมีย

สมบัติที่วิเคราะห์	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้ (%)
ปริมาณเถ้า (%)	6.31 ± 0.52
ปริมาณสารระเหยได้ (%)	6.16 ± 1.74
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%)	83.22 ± 1.86
ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)	0.46 ± 0.04

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และความหนาแน่นปรากฏของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการศึกษาวิจัยนี้ พบว่ามีปริมาณความชื้น 4.3 % มีปริมาณเถ้า 6.3 % มีปริมาณสารระเหยได้ 6.2 % มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 83.2 % และมีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 0.46 g cm⁻³

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์หาค่า พลังงานความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมียโดยใช้เครื่องบอมคาร์ลอรี่มิเตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานความร้อนที่ได้เท่ากับ 17.68 MJ kg⁻¹ หรือ 4,223 kcal kg⁻¹

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสรุปได้ว่าเศษกะลามะคาเดเมียที่ใช้ในการศึกษานี้ มีองค์ประกอบที่ประกอบไปด้วยไฮโดรเซลลูโลสร้อยละ 59.4 มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 28.9 จึงทำให้มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 30.5 อีกทั้งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 40.3 และปริมาณเถ้าร้อยละ 0.3 เป็นลักษณะของวัสดุจากธรรมชาติกลุ่ม Lignocellulosic material ซึ่งทำให้เปลือกกะลามะคาเดเมียมีลักษณะแข็ง มีสภาพทนจากความชื้นและไม่สามารถเกิดการย่อยสลายได้ง่าย จากการศึกษเพื่อเปลี่ยนรูปเศษกะลามะคาเดเมียให้เป็นถ่านผ่านกระบวนการไพโรไลซิสและคาร์บอนเซชัน เพื่อให้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้กะลามะคาเดเมียเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพดี โดยใช้เตาประดิษฐ์ขนาดเล็กที่มีความจุของห้องเผาไหม้ของการผลิตถ่านที่ความจุ 10 ลิตร ได้รับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบในเตาเผาที่มีขนาดบรรจุ 54 ลิตร ซึ่งการเผาที่อุณหภูมิในช่วง 400-500 °C จะใช้ระยะเวลาในการเผาถ่านและกะลามะคาเดเมียเกิดการเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านหมด ถ่านที่ได้มีลักษณะมันวาว และนำไฟฟ้าได้ โดยใช้ระยะเวลาในช่วงไล่ความชื้น และช่วงไล่สารที่ระเหยได้ (ช่วงเกิดควันบ่า) น้อยกว่า 3 ชั่วโมง การใช้ระยะเวลาในการปิดเตาหลังจากช่วงการเกิดควันบ่า 10 นาที จะได้ผลผลิตเป็นถ่านกะลามะคาเดเมียทั้งหมด มีน้ำหนักของถ่านที่ได้ปริมาณสูงสุดคือ 1.22 kg ซึ่งคิดเป็นร้อยละของผลผลิตเท่ากับ 40.7 มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 374.7 mg g⁻¹ แสดงให้เห็นว่าถ่านที่ผลิตได้มีสภาพของพื้นผิวที่มีสภาพความพรุน และเมื่อตรวจสอบลักษณะของสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ก็พบว่าพื้นผิวของถ่านกะลามะคาเดเมียมีสภาพความพรุนสูง แต่ทั้งนี้การเผาที่อุณหภูมิสูงหรือใช้ระยะเวลาดำเนินการปิดเตานานขึ้นจะทำให้มีเศษขี้เถ้าปะปนบางส่วนและได้ร้อยละของผลผลิตลดลงจากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า และความหนาแน่นปรากฏของถ่านกะลามะคาเดเมียที่

เตรียมได้จากการศึกษาวิจัยนี้ พบว่ามีปริมาณความชื้น 4.3 % มีปริมาณเถ้า 6.3 % มีปริมาณสารระเหยได้ 6.2 % มีปริมาณคาร์บอนคงตัว 83.2 % และมีความหนาแน่นรวมเท่ากับ 0.46 g cm^{-3} และจากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมียจากค่าที่วิเคราะห์ได้จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้จากการวิเคราะห์หาค่าพลังงานความร้อนของถ่านกะลามะคาเดเมียโดยใช้เครื่องบอมบาร์-ลอรี่เตอร์ พบว่ามีค่าพลังงานความร้อนที่ได้เท่ากับ 17.68 MJ kg^{-1} หรือ $4,223 \text{ kcal kg}^{-1}$ ซึ่งค่าพลังงานความร้อนที่วัดได้นี้อาจมีค่าที่น้อยกว่าความเป็นจริงซึ่งอาจเกิดจากการที่ถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้มีความหนาแน่นน้อยและมีความพรุนสูงจึงทำให้มีค่าพลังงานความร้อน HHV ไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับเปลือกกะลามะคาเดเมียก่อนเผาที่ให้พลังงานความร้อนใกล้เคียงกันเนื่องจากยังมีทั้งปริมาณคาร์บอนคงตัวและสารระเหยได้ที่มีผลต่อค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล[4] อีกทั้งยังมีความแข็งแรงและความหนาแน่นมากกว่า ดังนั้นจากคุณสมบัติของถ่านกะลามะคาเดเมียที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ ถ่านกะลามะคาเดเมียที่เตรียมได้โดยการเผาด้วยเตาเผาประดิษฐ์ขนาดเล็กนี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือการใช้เป็นถ่านอัดแท่งเชื้อเพลิง แต่ควรมีการนำไปใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติด้านพื้นผิวที่มีสภาพความพรุน และสภาพการนำไฟฟ้าได้ ซึ่งอาจนำไปใช้พัฒนาต่อไปเป็นเพื่อให้เป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อให้เป็นวัสดุสำหรับการดูดซับ หรือนำไปดัดแปรต่อไปเพื่อให้เป็นวัสดุสำหรับการกักเก็บประจุ พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพ และเป็นสารตั้งต้นในการผลิตวัสดุคอมโพสิตร่วมกับวัสดุอื่น ๆ เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์เฉพาะด้านที่ต้องการต่อไป

คำขอบคุณ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ผ่านความเห็นชอบจากคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2562 ขอขอบคุณศูนย์วิจัยเกษตรพื้นที่สูง อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบตัวอย่าง อีกทั้งคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mereles, L. G., et al. (2017). Chemical composition of *Macadamia integrifolia* (Maiden and Betcher) nuts from Paraguay. *International Food Research Journal*, 24(6), 2599-2608.
- [2] Wechsler, A., et al. (2013). *Macadamia* (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinus communis*) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard. *Materials and Design*, 50, 117-123.
- [3] Wang, C-H., et al. (1995). Deformation and fracture of *Macadamia* nuts Part1: Deformation analysis of nut-in-shell. *International Journal of Fracture*, 69, 14.
- [4] Nhuchhen, D. R. & Abdul Salam, P. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55-63.
- [5] Schuler, P., et al. (2014). Structure-function relationships in *Macadamia integrifolia* seed coats-fundamentals of the Hierarchical microstructure. *PLOS ONE*, 9(8), 1-14.

- [6] Moonsri, P. & Hutem, A. (2018). Biomass-briquettes fuel from local wisdom for producer gas production. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 8 (special issue), 286-295.
- [7] Teeta, S., et al. (2017). Thermal properties of green fuel briquettes from residue corncobs materials mixed macadamia shell charcoal powder. *Journal of Physics: Conference Series*, 901, 012042.
- [8] Fan, F., et al. (2018). Preparation and properties of hydrochars from macadamia nut shell via hydrothermal carbonization. *Royal society open science*, 5, 1-10.
- [9] Dejang, N., et al. (2015). A preparation of activated carbon from macadamia shell by microwave irradiation activation. *Energy Procedia*, 79, 727-732.
- [10] Ahmadpour, A. & Do, D. D. (1997). The preparation of activated carbon from macadamia nut shell by chemical activation. *Carbon*, 35(12), 1723-1732.
- [11] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1999). *Alpha, beta and gamma cellulose in pulp. Tappi Rule T203 om-88*. Atlanta: TAPPI
- [12] Browing, B. L. (1963). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. New York: Interscience Publishers.
- [13] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *Test method T 222 om-02 acid-insoluble lignin in wood and pulp*. Atlanta: TAPPI
- [14] Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *Test method T211 om-02 ash in wood, pulp, paper and paperboard*. Atlanta: TAPPI
- [15] Moonsri, P., et al. (2016). Production of activated carbon from moldy damaged tamarind pod. *Applied Mechanics and Materials*, 885, 137-142.
- [16] Han, J. S. & Rowel, J. S. (1996). *Chemical composition of fibers*. Boca Raton (FL): CRC Press.