

บทที่ 4

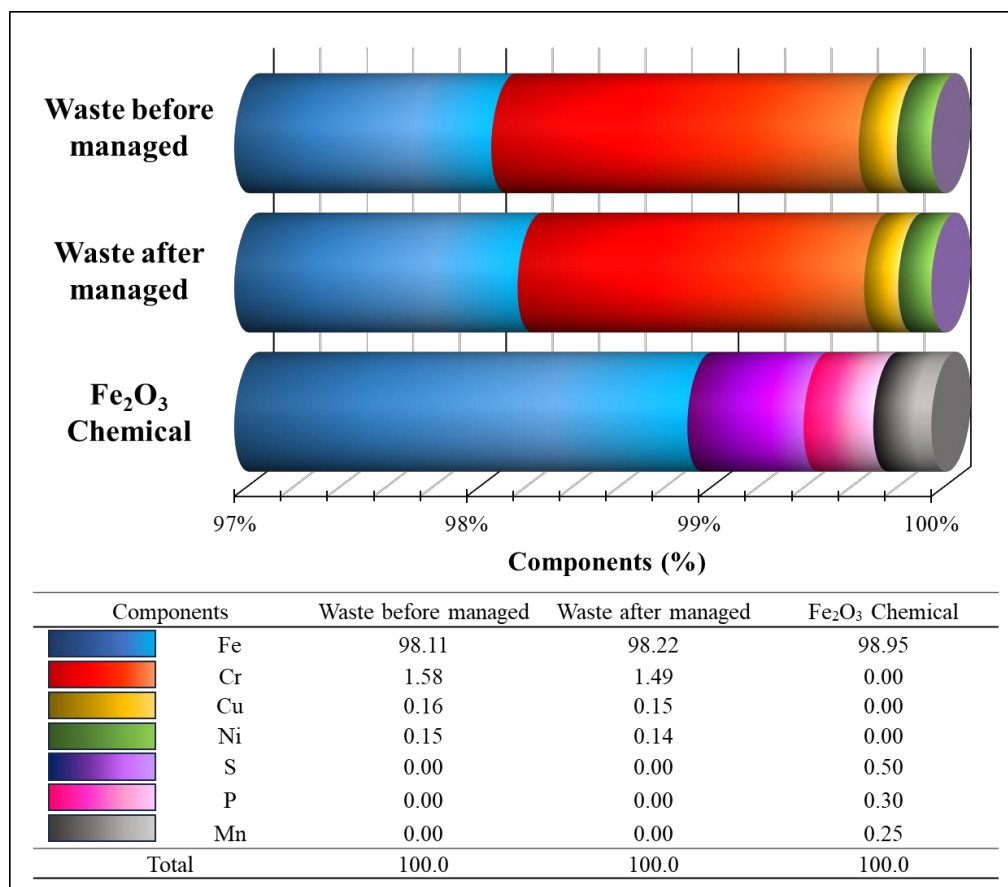
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.1 การจัดการของเสียและการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรม ชิ้นส่วนยานยนต์

4.1.1 การศึกษาปริมาณองค์ประกอบเคมีในของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วย เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

จากการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence; XRF) แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก่อนนำไปผ่านกระบวนการจัดการ มีเหล็ก (Fe; Iron) เป็นองค์ประกอบหลัก ด้วยปริมาณ Fe สูงถึง 98.11% และมีองค์ประกอบอื่นได้แก่ โครเมียม (Cr; Chromium) ทองแดง (Cu; Copper) และ นิกเกิล (Ni; Nickel) มีปริมาณ 1.58% 0.16% และ 0.15% ตามลำดับ ซึ่งธาตุเหล่านี้ถูกเติมเข้าไปในโครงสร้างของเหล็กเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของเหล็ก (Z. Ahmad, 2006) (C. Wang, 2021) โดย Cr ถูกเติมเพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและเพิ่มความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ส่วน Cu เติมเข้าไป 0.2-0.5% ช่วยต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศ และ Ni ช่วยเพิ่มความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนและทำให้เกิดความเสถียรของโครงสร้างเหล็กที่ถูกเรียกว่าออสเตไนต์ (Austenite)

เมื่อนำของเสียที่ผ่านกระบวนการจัดการ โดยการล้างด้วยน้ำ แล้วใช้แม่เหล็กดูดแยกเหล็กออกจากสิ่งเจือปน ก่อนจะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาด เมื่อนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุด้วยเครื่อง XRF พบว่ามีองค์ประกอบเคมีเช่นเดียวกับของเสียก่อนผ่านกระบวนการจัดการ โดยมี Fe ปริมาณ 98.22% และปริมาณองค์ประกอบเคมีอื่น ๆ ใกล้เคียงกัน ซึ่งปริมาณ Fe ที่ได้จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับสารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem) ที่มี Fe ปริมาณ 98.95% เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมีสารประกอบชนิดอื่นเจืออยู่ ได้แก่ ซัลเฟอร์ (S; Sulfur) 0.50% ฟอสเฟต (P; Phosphorus) 0.30% และแมงกานีส (Mn; Manganese) 0.25% อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วย XRF นั้น สามารถวิเคราะห์ได้เพียงธาตุและปริมาณของธาตุในวัสดุเท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ในการวิเคราะห์หาวัฏภาคและชนิดของสารประกอบ เพื่อสนับสนุนผลการทดลองและช่วยให้สามารถหาแนวทางในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

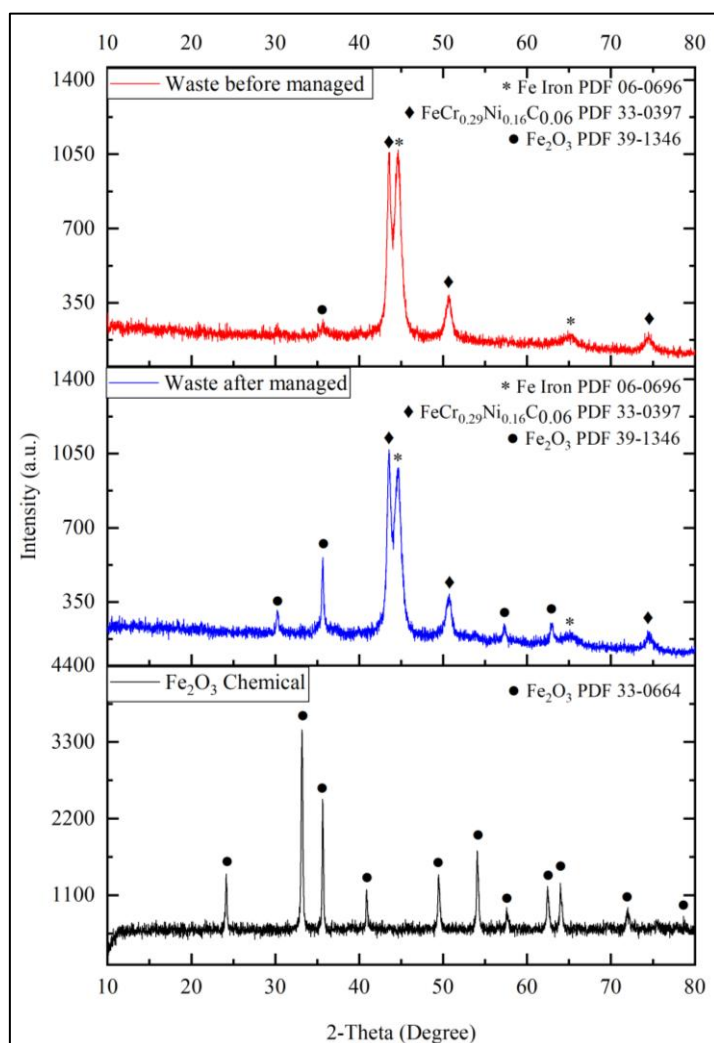
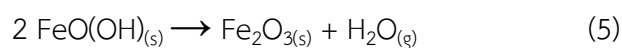
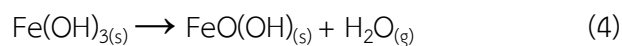
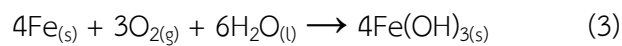


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่อง XRF ของเสียก่อน-หลังผ่านการจัดการและสารเคมีชนิด Fe₂O₃

4.1.2 การตรวจสอบวัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ผลการตรวจสอบวัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยเครื่อง XRD แสดงดัง รูปที่ 4.2 พบว่า วัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ก่อนผ่านกระบวนการล้าง (เส้นสีแดง) ประกอบด้วย 3 วัฏภาค ได้แก่วัฏภาคของ Fe (JCPDS No. 06-0696) เหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนไนต์-304 FeCr_{0.29}Ni_{0.16}C_{0.06} (JCPDS No. 33-0397) และ Fe₂O₃ (JCPDS No. 39-1346) หลังจากนำของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ไปล้างด้วยน้ำ ใช้แม่เหล็กดูดและอบให้แห้งด้วยความร้อน เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย XRD (เส้นสีน้ำเงิน) พบว่า ประกอบด้วย 3 วัฏภาคเช่นเดียวกัน แต่เมื่อสังเกตพีคที่มุม 2θ ประมาณ 44° พบว่า เป็นพีคของ Fe และมีความเข้มลดลง ซึ่งเกิดจาก Fe ทำปฏิกิริยากับความชื้น (H₂O) และถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจากการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ Fe บางส่วนเปลี่ยนวัฏภาคเป็น Fe₂O₃ (H. Tamura, 2008) (G. Ketteler, 2001) แสดงดังสมการที่ 3-5 โดยส่งผลให้ความเข้มของพีค Fe₂O₃ (JCPDS No. 39-1346) ที่มุม 2θ

ประมาณ 30° 36° 58° และ 63° มีความเข้มสูงขึ้น ในขณะที่สารเคมีชนิด Fe_2O_3 (Ajax Finechem) (เส้นสีดำ) ตรวจพบวัฏภาคเดียวของ Fe_2O_3 (JCPDS No. 33-0664)

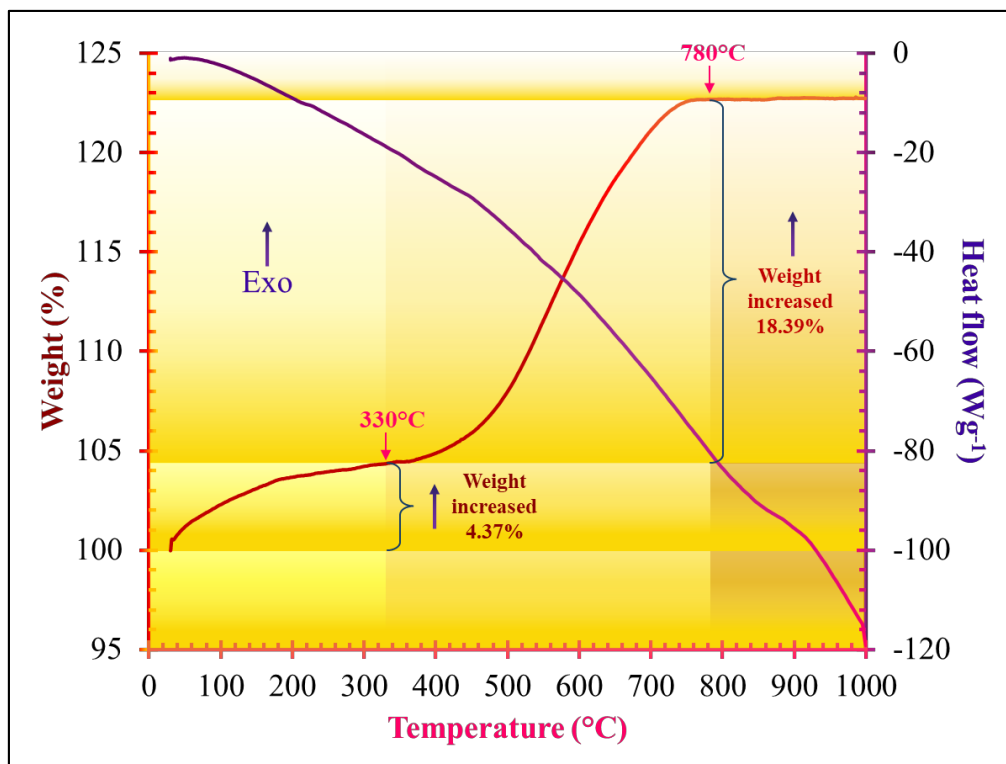


รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเครื่อง XRD ในของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ และสารเคมีชนิด Fe_2O_3

จากผลการตรวจสอบวัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยเครื่อง XRD ทำให้ทราบว่าของเสียที่ผ่านกระบวนการล้างแล้วนั้น ยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เนื่องจากประกอบด้วยหลายวัฏภาค บ่งบอกถึงความไม่บริสุทธิ์ของวัสดุ จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสูตรเคมี เพื่อให้เกิดเป็นวัฏภาคเดียวของ Fe_2O_3 ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปคำนวณสูตรเคมีและสะดวกต่อการนำไปใช้ประโยชน์อื่นต่อไปได้

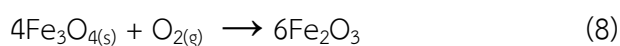
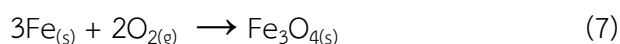
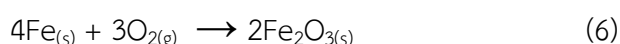
อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนสูตรเคมีให้เกิดเป็นวัฏภาคเดียวของ Fe_2O_3 สามารถทำได้หลายวิธีหนึ่งในวิธีการที่ทำได้ง่าย กระบวนการไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดของเสียอื่นตามมา ได้แก่ การให้ความร้อนในบรรยากาศออกซิเดชัน ดังนั้น เพื่อหาสภาวะและช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของของเสียให้เกิดเป็นวัฏภาคเดียวของ Fe_2O_3 จึงได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนด้วยเครื่อง STA ซึ่งจะช่วยให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานและน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน

4.1.3 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสูตรเคมีของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ให้เป็น Fe_2O_3 โดยใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยเครื่อง STA ของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการจัดการของเสีย

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ในช่วงอุณหภูมิ 30-1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สอากาศ (Air Zero) ซึ่งเป็นแก๊สที่ประกอบด้วย O_2 21% และ N_2 ที่มีความบริสุทธิ์สูง (T. Vijayaraghavan, 2020) ด้วยเครื่อง STA ดังรูปที่ 4.3 ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุ ที่อุณหภูมิ 70 220 420 560 และ 880 องศาเซลเซียส ซึ่งทุกตำแหน่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักทำให้ทราบได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 30-330 องศาเซลเซียส เกิดจากปฏิกิริยาคายพลังงานเพื่อสร้างพันธะกัน โดยบางส่วนของ Fe ที่เป็นวัฏภาคหลักของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจน (O_2) ในอากาศเกิดเป็น Fe_2O_3 (G. Ketteler, 2001) แสดงดังสมการที่ 6 และบางส่วนของ Fe ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ O_2 ในอากาศเกิดเป็น Fe_3O_4 (G. Ketteler, 2001) แสดงดังสมการที่ 7 ส่งผลให้น้ำหนักของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์เพิ่มขึ้น 4.37% ณ อุณหภูมิสูงกว่า 330 องศาเซลเซียส จนถึงช่วงอุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส น้ำหนักของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์เพิ่มขึ้นอีก 18.39% เกิดจาก Fe ส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาในช่วงแรก คายความร้อนเพื่อสร้างพันธะกับ O_2 ในอากาศอีกครั้งและเกิดเป็นสารประกอบ Fe_2O_3 นอกจากนี้ เมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจะทำให้ Fe_3O_4 ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาในช่วงแรกทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ O_2 อีกครั้ง เกิดเป็น Fe_2O_3 (I. Kazeminezhad, 2014) (F. Genuzio, 2014) แสดงดังสมการที่ 8 และหลังจากช่วงอุณหภูมิ 780 องศาเซลเซียส เกิดการคายพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเตตระโกนัล (Tetragonal) ของ $\gamma\text{-Fe}_2O_3$ เป็นรอมโบอีดรัล (Rhombohedral) $\alpha\text{-Fe}_2O_3$ (I. Kazeminezhad, 2014)

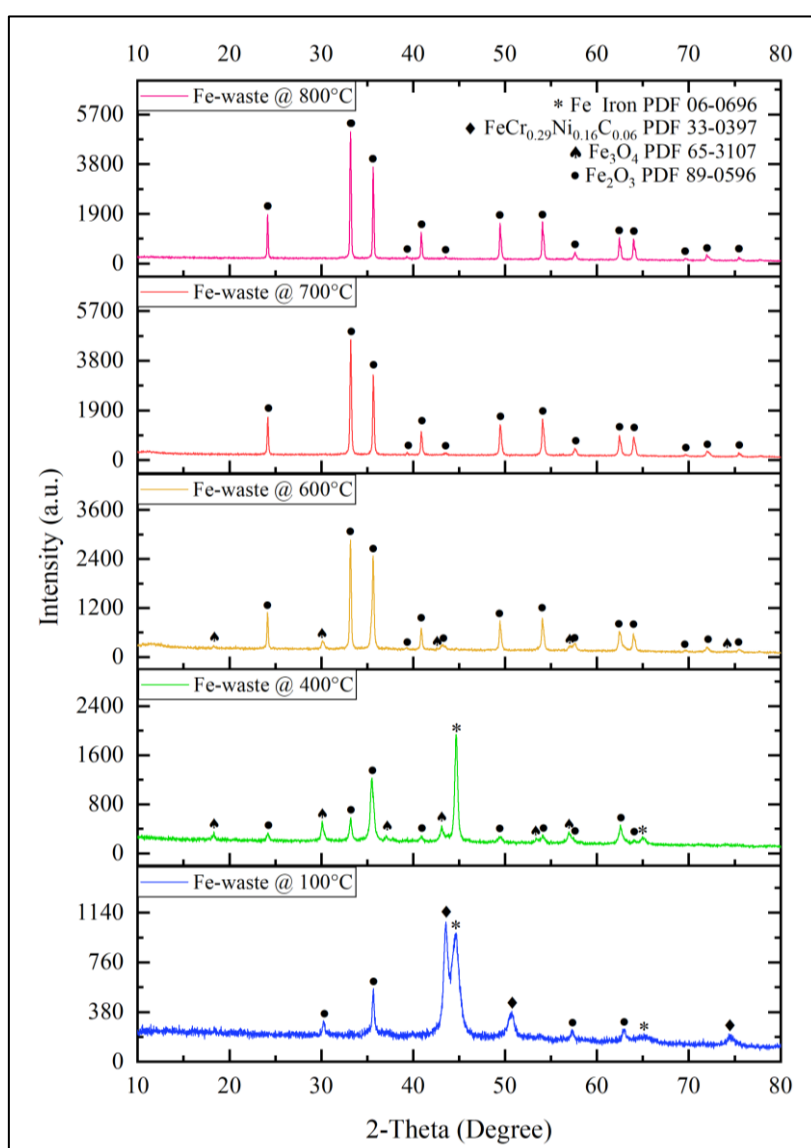


4.1.4 การตรวจสอบวัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์หลังผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนของเสียให้เป็นวัฏภาคเดียวของ Fe_2O_3 อย่างสมบูรณ์นั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 400-800 องศาเซลเซียส ดังนั้น การทดลองเบื้องต้นจึงได้ดำเนินการเผา

แคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเผาแช่นาน 2 ชั่วโมง เพื่อประเมินอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการแคลไซน์ของเสียดังกล่าว โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Diffraction (XRD) เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบวัฏภาคของสารที่เกิดขึ้น

เมื่อได้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว จึงได้ดำเนินการทดลองเพิ่มเติม โดยเลือกช่วงอุณหภูมิที่แคบลง เพื่อระบุค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเปลี่ยนองค์ประกอบให้เป็น Fe_2O_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่สามารถเปลี่ยนองค์ประกอบในของเสียให้กลายเป็นวัฏภาคเดียวของ Fe_2O_3 ได้อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



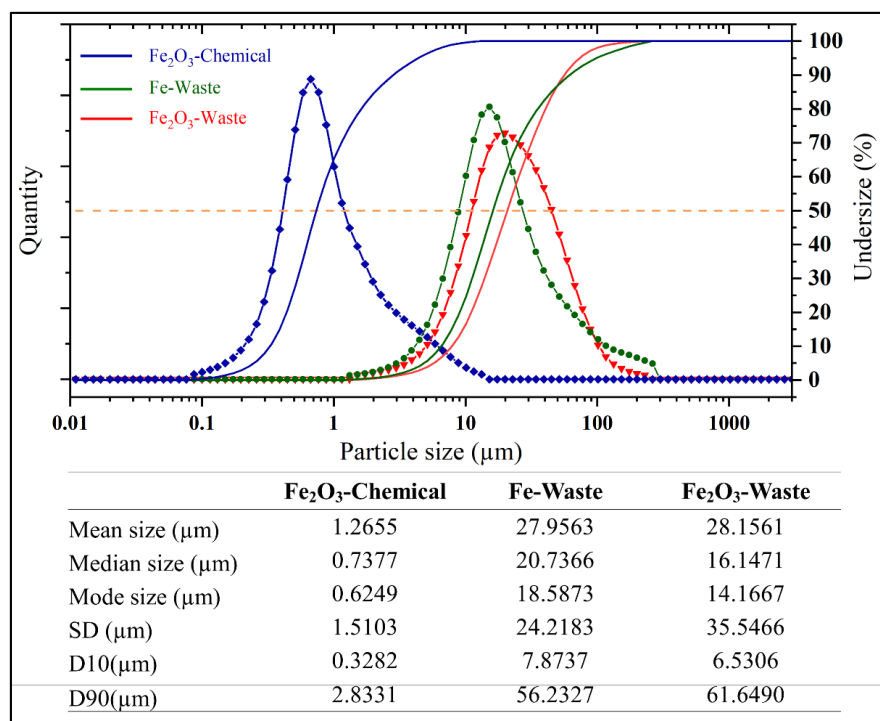
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง XRD

วัฏภาคเริ่มต้นหลังจากการอบแห้งของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประกอบด้วย 3 วัฏภาค ได้แก่ Fe อ้างอิงโดย JCPDS No. 06-0696 $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ อ้างอิงโดย JCPDS No. 33-0397 และ Fe_2O_3 อ้างอิงโดย JCPDS No. 39-1346 เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ทำให้ $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ บางส่วนเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Fe จึงทำให้ตรวจพบปริมาณของ Fe มีความเข้มข้นสูงขึ้น บางส่วนจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเปลี่ยนโครงสร้างเป็น Fe_2O_3 อ้างอิงโดย JCPDS No. 89-0596 และ Fe_3O_4 อ้างอิงโดย JCPDS No. 65-3107 ซึ่ง ณ อุณหภูมิดังกล่าวไม่พบวัฏภาคของ $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ เหลืออยู่ เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่า Fe และ Fe_3O_4 ทำปฏิกิริยากับ O_2 ในอากาศ เปลี่ยนสูตรเคมีเป็น $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ อ้างอิงโดย JCPDS No. 89-0596 ที่มีโครงสร้างเป็นเตตระโกนัล (I. Kazeminezhad, 2014) มีลักษณะกายภาพเป็นสีน้ำตาลดำ แต่ ณ อุณหภูมิดังกล่าวยังคงตรวจพบ Fe_3O_4 เหลืออยู่บางส่วน เมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส การเพิ่มอุณหภูมิที่มากขึ้น จะส่งผลให้สารประกอบ Fe_3O_4 ที่เหลืออยู่เปลี่ยนสูตรเคมีเป็น $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนัลรวมอยู่กับโครงสร้างรวมโบฮีตรัล (I. Kazeminezhad, 2014) ณ อุณหภูมิแคลไซน์ดังกล่าว จะทำให้ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์เปลี่ยนวัฏภาคเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ Fe_2O_3 อย่างสมบูรณ์ และเมื่อแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนอุณหภูมิเท่ากับ 800 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของฟีด Fe_2O_3 จะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบเป็น Fe_2O_3 ที่มีโครงสร้างรวมโบฮีตรัล (I. Kazeminezhad, 2014) โดยมีลักษณะกายภาพเป็นสีน้ำตาลแดง

จากผลการวิเคราะห์วัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง XRD ทำให้สามารถทราบได้ว่า ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์สามารถเกิดเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ Fe_2O_3 ที่สมบูรณ์ได้ โดยใช้เพียงความร้อนในการกระตุ้นปฏิกิริยาเท่านั้น ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว ยังทำให้ทราบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการแคลไซน์คือ 700 องศาเซลเซียส และใช้เวลาเผาแค่ 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศที่ออกซิเดชัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ของเสียที่เปลี่ยนสูตรเคมีด้วยวิธีทางความร้อนให้เกิดเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ Fe_2O_3 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบชนิดใหม่ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส ถึงแม้ว่าจะมีการรวมกันอยู่ของโครงสร้างเตตระโกนัลและรวมโบฮีตรัล แต่ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้พลังงานในการทดลองให้น้อยที่สุด เพื่อเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการจัดการกับของเสีย นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียเกิดการหลอมแล้วจับตัวกัน ส่งผลทำให้มีอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของของเสียลดลง ทำให้ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมได้น้อยลง และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพเมื่อนำไปสังเคราะห์เป็นวัสดุตรวจจับแก๊ส

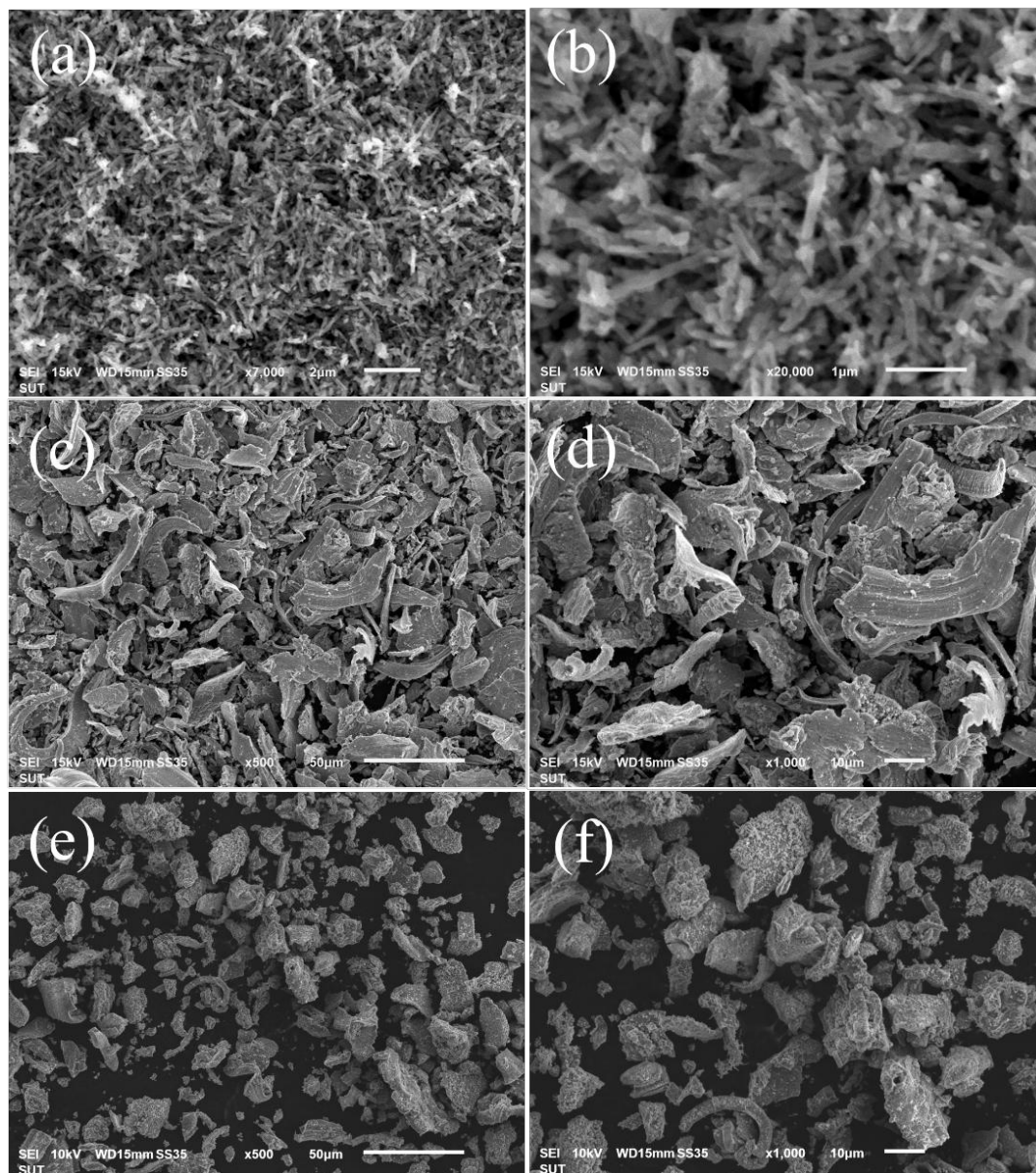
4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีชนิด Fe_2O_3 โดยใช้เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีชนิด Fe_2O_3 โดยใช้เครื่อง PSD แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าขนาดอนุภาคของสารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem) ขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 0.33-2.83 μm และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.27 μm มีการกระจายตัวของอนุภาคในช่วงแคบ ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.51 μm ในขณะที่ขนาดอนุภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก่อนเผาแคลไซน์มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 7.87-56.23 μm และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าสารเคมีเท่ากับ 27.96 μm ซึ่งเป็นขนาดที่ใหญ่กว่าสารเคมี นอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาคกว้างโดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 24.22 μm ส่วนขนาดอนุภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์หลังผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 6.53-61.65 μm ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 28.16 μm มีความใกล้เคียงกับของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก่อนเผาแคลไซน์ นอกจากนี้ยังมีการกระจายตัวของอนุภาคแบบกว้าง โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 35.55 μm



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีชนิด Fe_2O_3 โดยใช้เครื่อง PSD

4.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



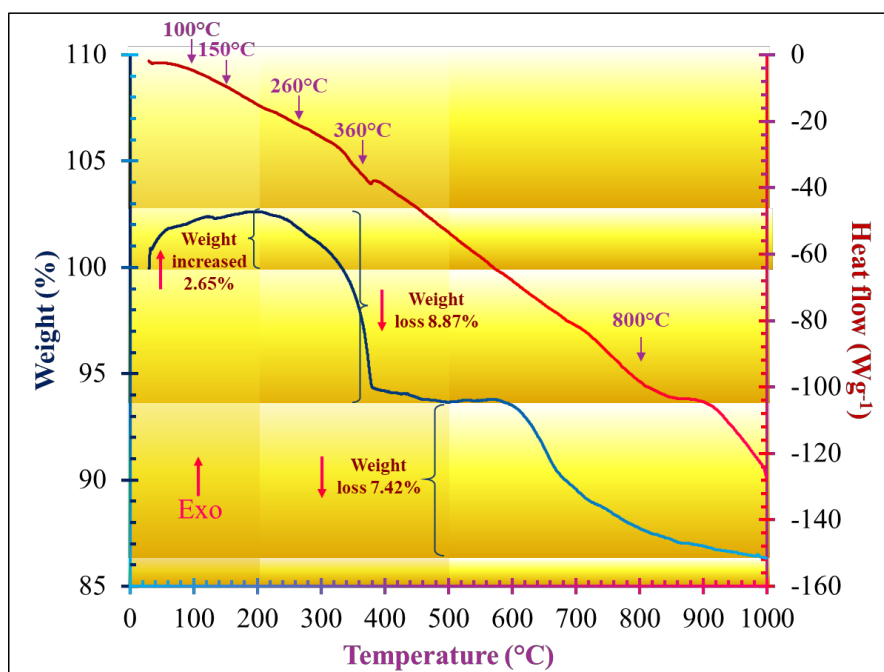
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีโดยใช้กล้อง SEM (a-b) สารเคมี Fe₂O₃ (c-d) ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ (e-f) ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe₂O₃ ด้วยวิธีทางความร้อน

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM ของสารตั้งต้นสำหรับนำไปสังเคราะห์วัสดุตรวจจับแก๊สแสดงให้เห็นลักษณะของอนุภาคสารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem) ที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกคล้ายเข็ม เมื่อทำการวัดขนาดโดยใช้โปรแกรม ImageJ ด้วยเทคนิค Martin's diameter (R. J. Crawford, 2002) (D. Wang, 2013) มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $0.32 \pm 0.26 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.6 (a-b) ในขณะที่ขนาดอนุภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก่อนผ่านการเผาแคลไซน์ มีลักษณะเป็นแผ่นรูปร่างไม่แน่นอน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $11.19 \pm 8.41 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.6 (c-d) และของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์หลังจากผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีลักษณะโค้งมกลไกคล้ายเกลียวทรงกลมมากกว่าของเสียก่อนแคลไซน์ เนื่องจากผ่านการบัดด้วยโกร่งและร้อนผ่านตะแกรงคัดขนาดรูปร่างคล้ายเปลือกไข่แตก มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ $8.98 \pm 5.19 \mu\text{m}$ แสดงดังรูปที่ 4.6 (e-f) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระจายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง PSD เป็นไปได้ว่าค่าที่วัดได้เกิดจากการเกาะกันของอนุภาคนาขนาดเล็ก (Agglomeration) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างมวล (L. Lu, 2015) ส่งผลให้ค่าการวัดขนาดของอนุภาคที่วัดได้จากเครื่อง PSD มีค่าสูงกว่าการศึกษาขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่อง SEM

4.2 การสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

4.2.1 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาแคลไซน์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

สำหรับขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ด้วยวิธีการบดผสมเชิงกล โดยนำของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านกระบวนการจัดการต่าง ๆ มาเป็นสารตั้งต้นและบดผสมกับ La_2O_3 โดยใช้เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) เป็นตัวกลาง ในหม้อบดเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนที่ถูกคำนวณไว้ ก่อนที่จะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปร้อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 เมช เพื่อให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาแคลไซน์ให้สารตั้งต้นเกิดเป็น $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางของน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนและการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของวัสดุด้วยเครื่อง STA ในช่วงอุณหภูมิ 30-1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊ส Air Zero

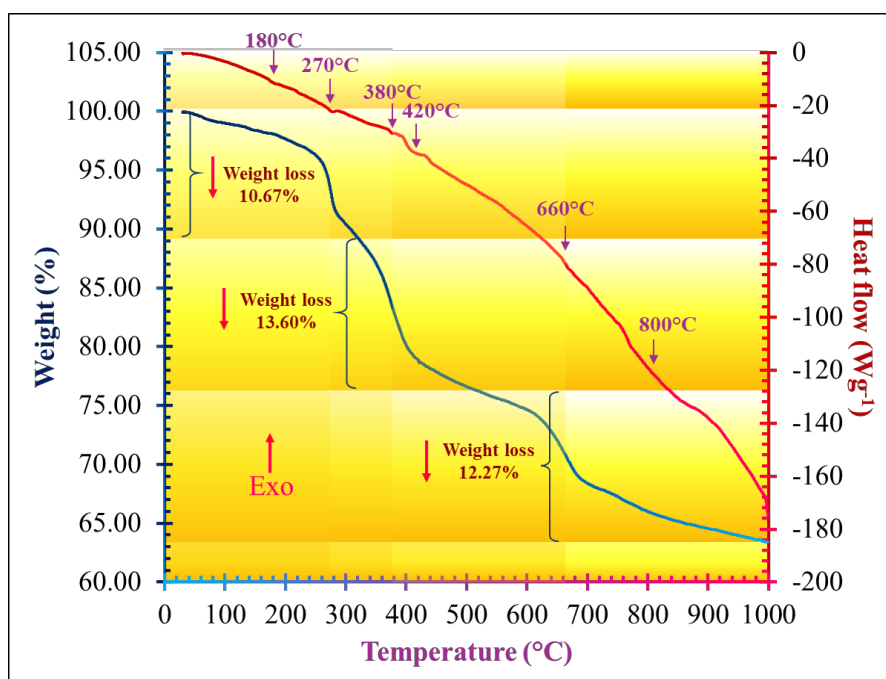


รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยเครื่อง STA ของวัสดุโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง STA ของการนำของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านกระบวนการล้างและอบให้แห้งมาสังเคราะห์เป็นสารประกอบชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ แสดงดังรูปที่ 4.7 ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของทางความร้อนของวัสดุ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 150 องศาเซลเซียส 260 องศาเซลเซียส 360 องศาเซลเซียส และ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิ 30-200 องศาเซลเซียส เป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนเพื่อสร้างพันธะ โดยบางส่วนของ Fe ที่เป็นวัฏภาคหลักของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจน (O_2) ในอากาศ เกิดเป็น Fe_2O_3 [G. Ketteler, 2001] แสดงดังสมการที่ 8 ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้น 2.65% ซึ่งสอดคล้องกับผล STA และ XRD การแคลไซน์เพื่อเปลี่ยนสูตรเคมีของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ให้เป็น Fe_2O_3 ก่อนหน้า อนึ่ง เนื่องจาก La_2O_3 ไม่เสถียรในบรรยากาศปกติ จึงทำให้ดูดความชื้นทั้งในกระบวนการบดและในอากาศขณะอบ กลับไปอยู่ในรูปที่เสถียรมากกว่า คือ $\text{La}(\text{OH})_3$ (M. Sorescu, 2011) โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 200-500 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนเพื่อสลายพันธะของ $\text{La}(\text{OH})_3$ เปลี่ยนไปเป็น $\text{LaO}(\text{OH})$ แสดงดังสมการที่ 12 (P. Fleming, 2010) (T. Vijayaraghavan, 2020) ทำให้น้ำหนักลดลง 8.87% และหลังจากอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขึ้นไป จะเกิดปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนอีกครั้ง ซึ่งเป็นการสลายพันธะของ LaOOH กลับไปเป็น La_2O_3 อีกครั้ง ทำให้น้ำหนักลดลงอีก 7.42% อย่างไรก็ตาม

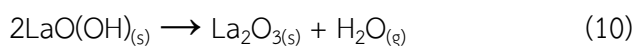
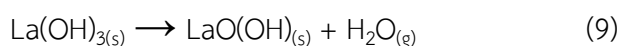
น้ำหนักของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มลดลงได้อีก แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้สำหรับแคลไซน์ให้สารตั้งต้นเกิดเป็น $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ควรแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส

ผลการตรวจสอบด้วยเครื่อง STA ของการนำของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนสูตรเคมีให้เกิดเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ Fe_2O_3 มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เป็นสาร/ประกอบชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ แสดงดังรูปที่ 4.8 ตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของทางความร้อนของวัสดุ ที่อุณหภูมิ 180 270 380 420 660 และ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ณ อุณหภูมิ 180 และ 270 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคูดพลังงานความร้อนเพื่อสลายพันธะของ $\text{La}(\text{OH})_3$ บางส่วนเป็น $\text{LaO}(\text{OH})$ ทำให้น้ำหนักลดลง 10.67% แสดงดังสมการที่ 9 (M. Sorescu, 2011) ณ อุณหภูมิ 380 และ 420 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาคูดพลังงานความร้อนเพื่อสลายพันธะของ $\text{La}(\text{OH})_3$ ส่วนที่เหลือเป็น $\text{LaO}(\text{OH})$ อีกครั้งทำให้น้ำหนักลดลงอีก 13.60% และ ณ ที่อุณหภูมิ 660-800 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาคูดพลังงานความร้อนเพื่อสลายพันธะของ $\text{LaO}(\text{OH})$ กลับไปเป็น La_2O_3 แสดงดังสมการที่ 10 (P. Fleming, 2010) (T. Vijayaraghavan, 2020) ทำให้น้ำหนักลดลงอีก 12.27%



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยเครื่อง STA ของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3 ด้วยวิธีทางความร้อน

จากผลการตรวจสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าน้ำหนักของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ยังไม่คงที่และมีแนวโน้มที่ลดลง เพื่อให้สารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นวัฏภาคเดียวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ได้สมบูรณ์ จึงควรแคลไซน์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับกับเอกสารที่เคยมีผู้ศึกษามาก่อนหน้า (S. Chokkha, 2024) อีกทั้งการเผาในสภาวะจริงเป็นการเผาสารประกอบในปริมาณมาก แตกต่างจากการทดลองด้วยเครื่อง STA จึงจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิการเผาให้สูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ใช้สำหรับแคลไซน์วัสดุโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ด้วยระยะเวลาเผาแค่ 2 ชั่วโมง



4.2.2 การตรวจสอบวัฏภาคของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ หลังจากการเผาแคลไซน์สารตั้งต้น โดยใช้เครื่อง XRD

ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem, 98%) แสดงดังรูปที่ 4.9 หลังจากบดผสมสารตั้งต้น La_2O_3 และ Fe_2O_3 โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ปรากฏวัฏภาคของ La(OH)_3 โครงสร้างเฮกซาโกนัล (Hexagonal) มี Space group คือ $P63/m (14)$ ซึ่งมี $a = 6.629 \text{ \AA}$, $b = 6.629 \text{ \AA}$ และ $c = 3.859 \text{ \AA}$ อ้างอิงโดย JCPDS No. 36-1481 เนื่องจาก La_2O_3 ที่ไม่เสถียรในบรรยากาศปกติ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับความชื้นและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับไปอยู่ในรูปที่เสถียรกว่าคือ La(OH)_3 (M. Sorescu, 2011) และพบ Fe_2O_3 ที่เป็นสารตั้งต้นในผลการวิเคราะห์ หลังจากนั้นเมื่อนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ใช้ระยะเวลาเผาแค่ 2 ชั่วโมง พบว่า สารตั้งต้นทั้งหมดทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ อย่างสมบูรณ์ โดยสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) Space group คือ $Pn\bar{a}(63)$ ซึ่งมี $a = 5.567 \text{ \AA}$, $b = 7.855 \text{ \AA}$ และ $c = 5.553 \text{ \AA}$ อ้างอิงโดย JCPDS No. 37-1493

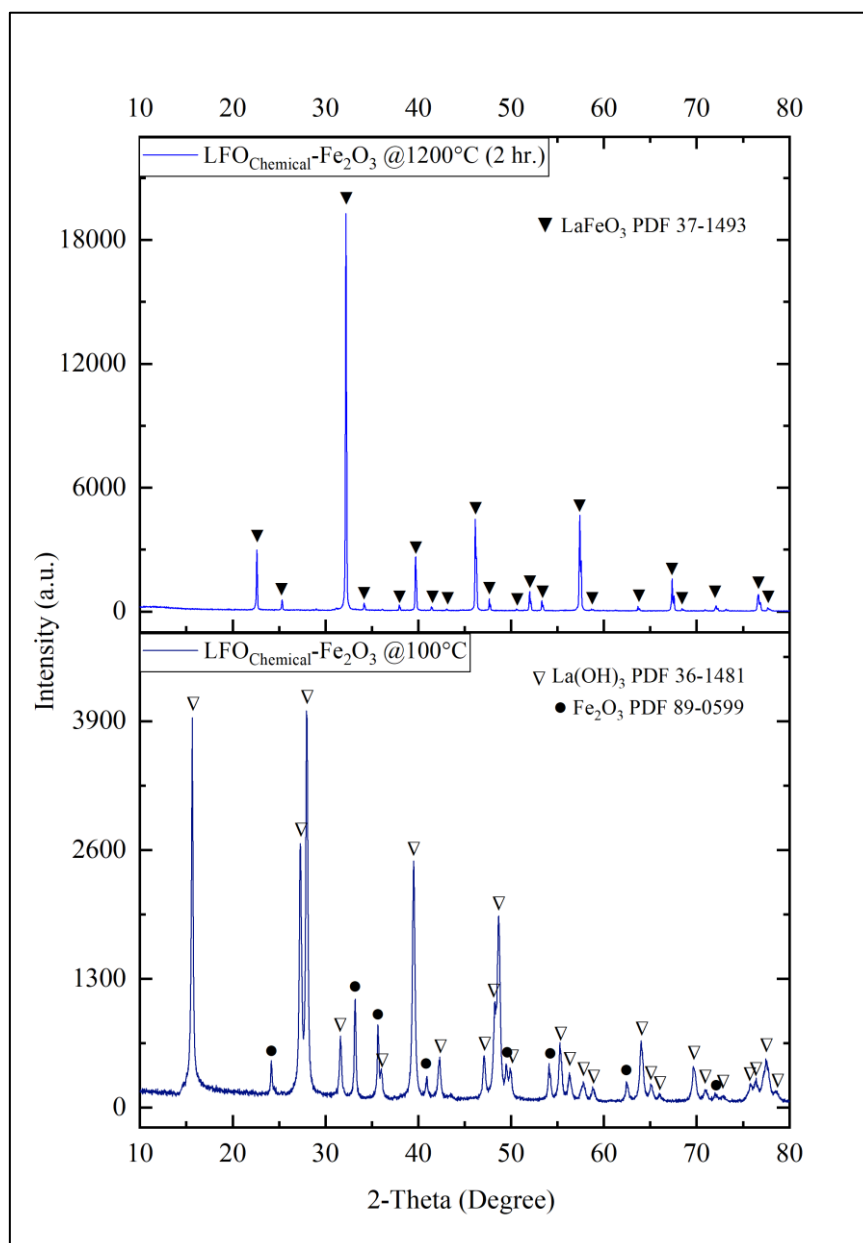
ผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนสูตรเคมีให้เกิดเป็นวัฏภาคเดี่ยวของ Fe_2O_3 แสดงดังรูปที่ 4.10 หลังจากบดผสมสารตั้งต้น La_2O_3 และ Fe_2O_3 โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ปรากฏวัฏภาค La(OH)_3

เช่นเดียวกับ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์จากสารเคมีและพบ Fe_2O_3 โครงสร้างรอมโบฮีดรัล (Rhombic.H.axes) มี Space group คือ R-3c(167) ซึ่งมี $a = 5.032 \text{ \AA}$, $b = 5.032 \text{ \AA}$ และ $c = 13.733 \text{ \AA}$ อ้างอิงโดย JCPDS No. 89-0599 หลังจากนั้นเมื่อนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ระยะเวลาเผาแช่ 2 ชั่วโมง พบว่า สารตั้งต้นทั้งหมดสามารถทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัฏภาคเดียวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ได้เช่นเดียวกันกับการสังเคราะห์ด้วยสารเคมี

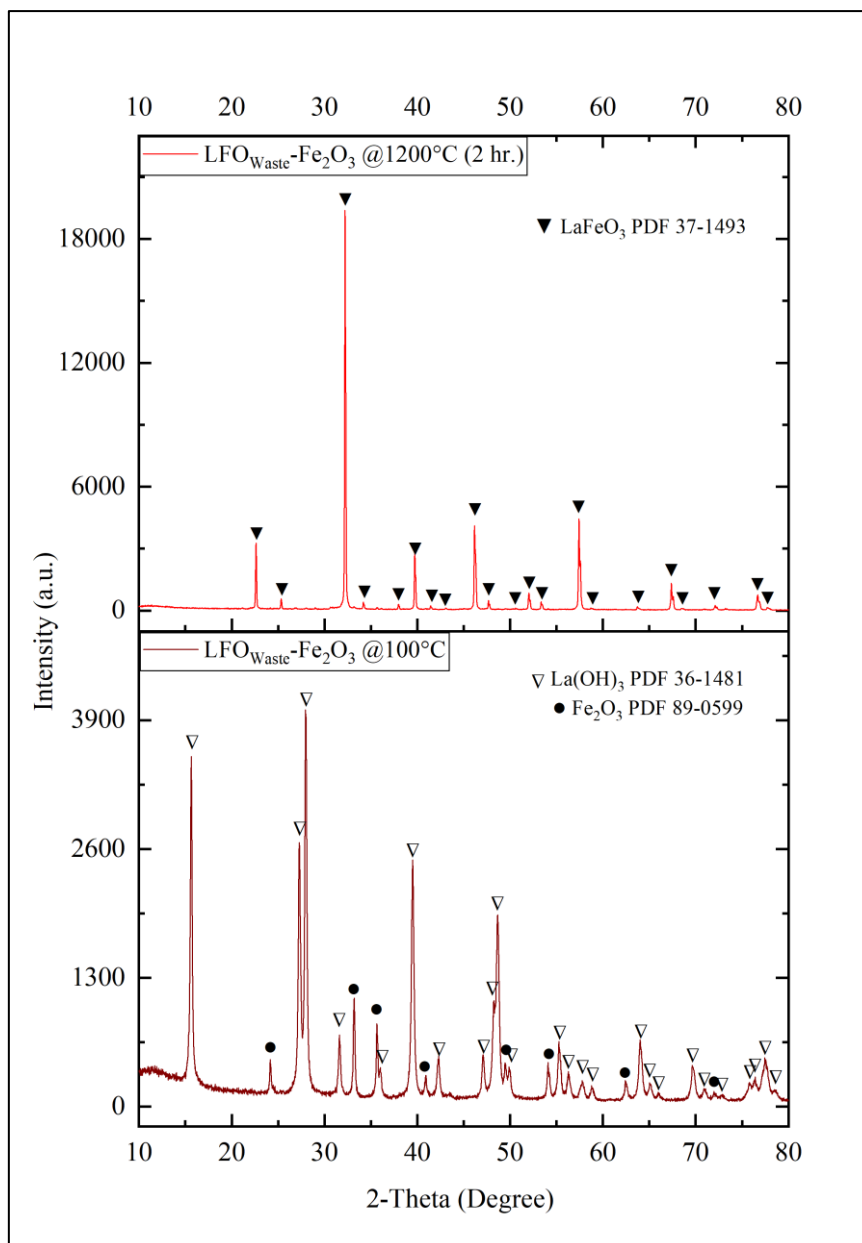
กระบวนการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ สามารถสังเคราะห์ได้จาก Fe_2O_3 ที่ได้จากการให้ความร้อนแก่ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ก่อนแล้วจึงนำไปบดผสมกับ La_2O_3 ในหม้อบดและเผาแคลไซน์อีกครั้งที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ในทางกลับกันผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ เนื่องจากต้องการลดขั้นตอนการทดลองและลดอุณหภูมิหรือความร้อนที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะส่งผลต่อราคาต้นทุนที่ลดลง ดังนั้น จึงเริ่มต้นด้วยการคำนวณอัตราส่วนน้ำหนัก โดยถือว่าของเสียนั้นมีสูตรเคมี คือ Fe เพียงอย่างเดียว เนื่องจากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์มีสูตรเคมี Fe เป็นส่วนใหญ่ (จากนี้ไปผู้เขียนขออนุญาตใช้ Fe-waste แทนของเสียที่ไม่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส) เมื่อคำนวณและชั่งน้ำหนักวัตถุดิบตั้งต้นทั้งหมดแล้ว นำ Fe-waste มาบดผสมกับ La_2O_3 โดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และเผาแคลไซน์เพียงครั้งเดียว ณ อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเผาแช่ 2 และ 5 ชั่วโมง ผลแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า ปรากฏวัฏภาค $\text{La}(\text{OH})_3$ ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมและตัวกลางเนื่องจากความไม่เสถียรของ La_2O_3 ในบรรยากาศปกติ นอกจากนี้ยังปรากฏวัฏภาคของ Fe (JCPDS No. 06-0696) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนไนต์-304 $\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06}$ (JCPDS No. 33-0397) ซึ่งเป็นวัฏภาคหลักของ Fe-waste และยืนยันผลได้จากการวิเคราะห์สารประกอบด้วย XRD ที่ได้ตรวจสอบไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1 การจัดการของเสียและการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

หลังจากนำสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste ไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้ระยะเวลาเผาแช่ 2 ชั่วโมง พบว่า ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นวัฏภาคเดียวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ได้ โดยนอกจากสารตั้งต้นบางส่วนทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นวัฏภาคของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ (JCPDS No. 37-1493) แล้วยังพบว่า Fe-waste ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊ส O_2 ในอากาศเกิดเป็น Fe_2O_3 (JCPDS No. 89-0599) (G. Ketteler, 2001) นอกจากนี้ยังพบ La_2O_3 (JCPDS No. 74-2430) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation reaction หรือ Dehydration reaction) เนื่องจากอุณหภูมิสูง จึงใช้เวลาเผาแช่นานขึ้นเป็น 5 ชั่วโมง พบว่า ยังคงไม่สามารถเกิดเป็นวัฏภาคเดียวของ

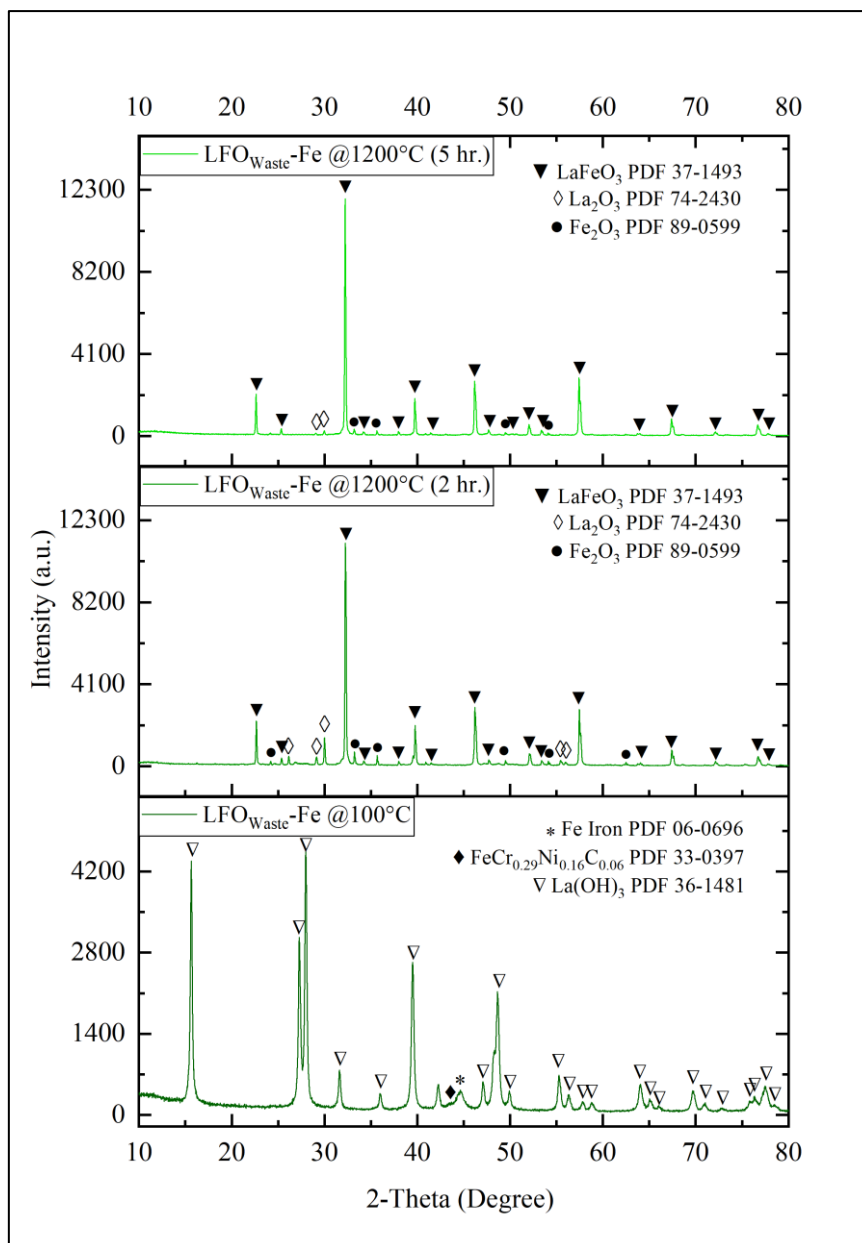
$\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ (JCPDS No. 37-1493) ได้ ถึงแม้ว่า ความเข้มของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ สูงขึ้น แต่ยังคงพบวัฏภาคของ Fe_2O_3 (JCPDS No. 89-0599) (G. Ketteler, 2001) และ La_2O_3 (JCPDS No. 74-2430) เหลืออยู่ด้วย ซึ่งการใช้อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยเผาแช่เป็นเวลานานกว่า 5 ชั่วโมง ถือเป็น การใช้พลังงานสูง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงไม่ศึกษาต่อในระยะเวลาที่นานกว่านี้



รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี Fe_2O_3



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3

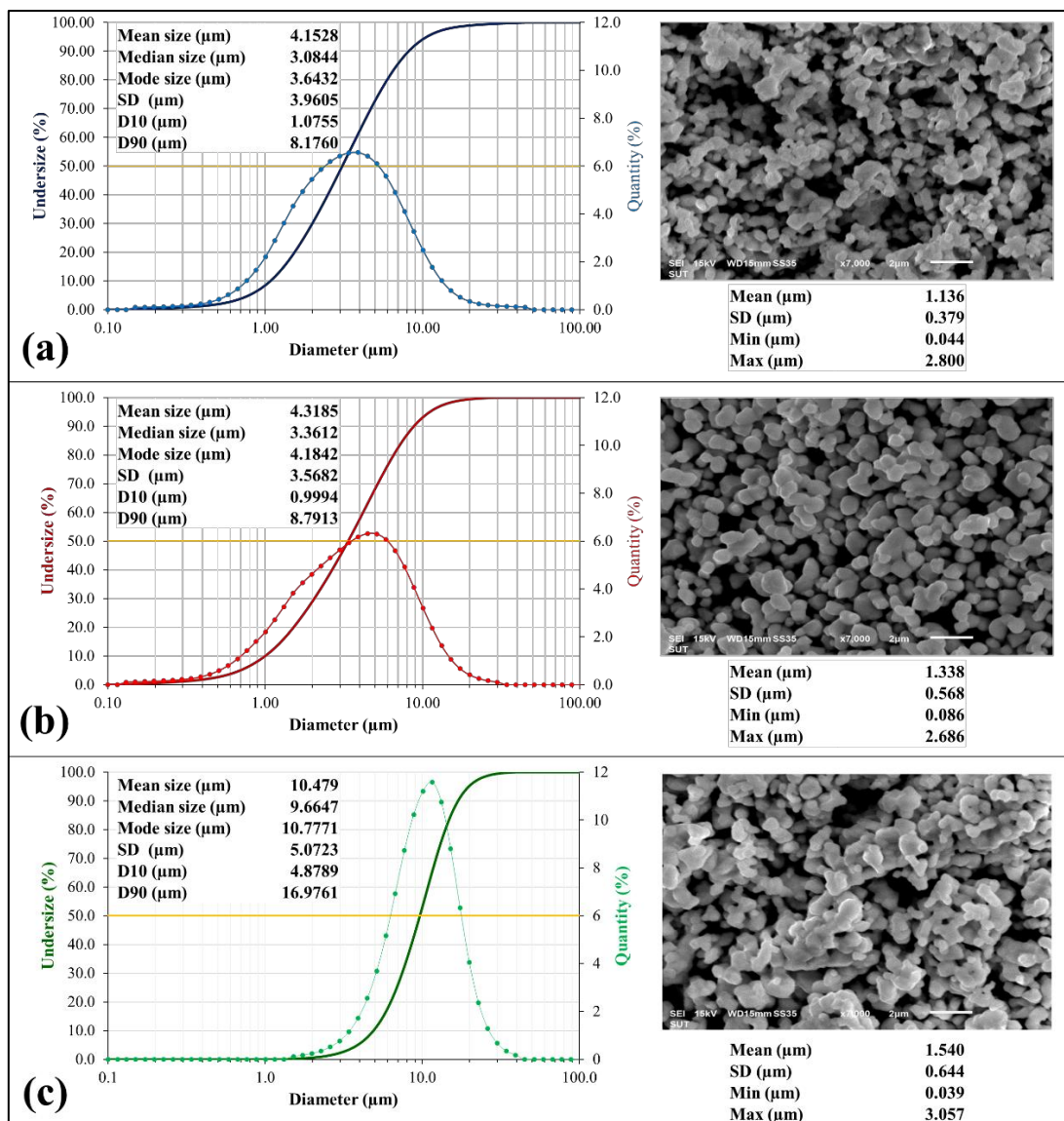


รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

4.2.3 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ โดยใช้เครื่อง PSD และ SEM

การตรวจสอบขนาดอนุภาคของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่อง PSD และ SEM แสดงดังรูปที่ 4.12 หลังจากทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จาก PSD มีขนาดใหญ่กว่า ขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์

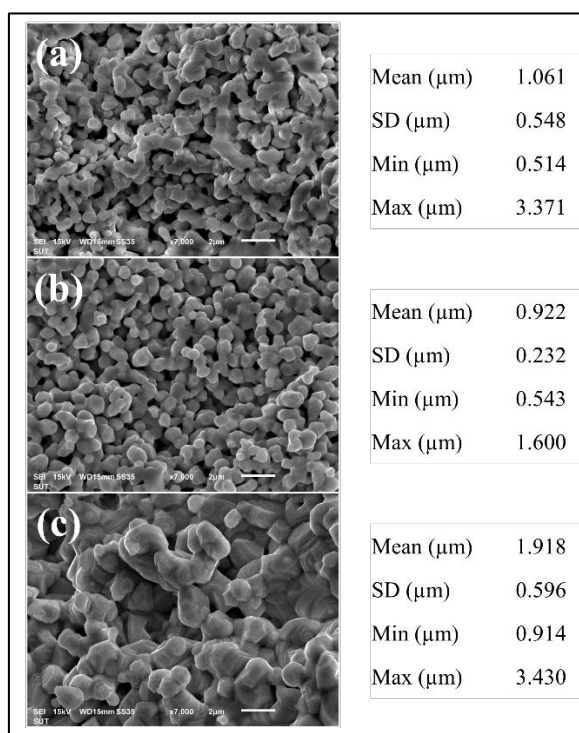
ได้จากเครื่อง SEM ซึ่งใช้หลักการวัดด้วยเทคนิค Martin's diameter (R. J. Crawford, 2002) (D. Wang, 2013) โดยใช้โปรแกรม ImageJ จะเห็นได้ว่า ขนาดอนุภาคของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ หลังจากผ่านการบดผสมและเผาแคลไซน์แล้วนั้น เกิดการหลอมตัวมีลักษณะรูปร่างคล้ายทรงกลมอื่น ทั้งยังมีส่วนที่เริ่มหลอมเชื่อมติดกัน ส่งผลให้ขนาดที่วัดได้จากเครื่อง PSD มีค่าที่ได้ใหญ่กว่าผลการวิเคราะห์จากเครื่อง SEM จากรูปที่ 4.12(a) ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารสารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem, 98%) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง PSD มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 1.08-8.18 μm และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.15 μm การกระจายตัวของอนุภาคในช่วงแคบ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.96 μm ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.14 ± 0.38 μm มีการหลอมตัวสูงเนื่องจากขนาดอนุภาคก่อนเผาแคลไซน์มีขนาดเล็กพื้นที่ผิวดัสมผัสสูง (A. Simchi, 2004) ทำให้อนุภาคหลอมติดกัน ซึ่งมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับผลของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เผาแคลไซน์อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.12(b) ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง PSD มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.32 μm และมีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 1.00-8.79 μm ซึ่งมีขนาดเล็กลงมากเมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ก่อนที่จะทำการบด นอกจากนี้ยังมีการกระจายตัวของอนุภาคแคบ โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.57 μm หมายความว่าขนาดของแต่ละอนุภาคมีความใกล้เคียงกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1.34 ± 0.57 μm ลักษณะคล้ายทรงกลม ในขณะที่วัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง PSD มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 4.88-16.98 μm ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 10.48 μm โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.07 μm จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคใหญ่ เมื่อเทียบกับ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์จากสารเคมีและของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เผาแคลไซน์อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste ใช้เวลาในการเผาสูง 1200 องศาเซลเซียส นานถึง 5 ชั่วโมง และส่วนหนึ่งมาจากที่ Fe มีอุณหภูมิหลอมตัว 1,535 องศาเซลเซียส (R. Łobinski, 1996) ซึ่งต่ำกว่า Fe_2O_3 มีอุณหภูมิหลอมตัว 1,565 องศาเซลเซียส (National Institutes of Health, 2005) ทำให้อนุภาคหลอมติดกันเห็นได้จากภาพ SEM แสดงดังรูปที่ 4.12(c) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.54 ± 0.64 μm



รูปที่ 4.12 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคและโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง PSD และ SEM ของวัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก (a) สารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem, 98%) (b) ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3 และ (c) Fe-waste

4.3 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์หลังการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ หลังจากอัดขึ้นรูปและเผาผนึก โดยใช้เครื่อง SEM

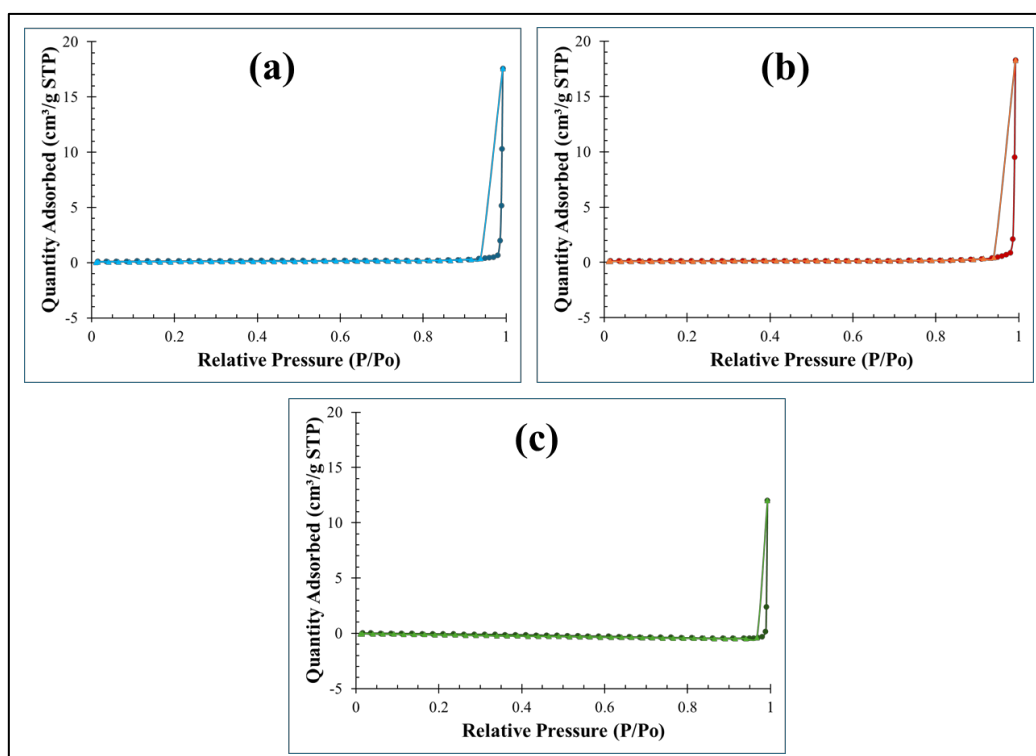


รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM ของวัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอร์อฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก (a) สารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem, 98%) (b) ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3 และ (c) Fe-waste

การตรวจสอบขนาดอนุภาคของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ โดยศึกษาจากเครื่อง SEM แสดงดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคที่ได้เมื่อเปรียบเทียบ ก่อน-หลังการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า หลังการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกแล้วชิ้นงานมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการหลอมตัวรวมกันของอนุภาค ผลที่ได้จาก SEM ที่วัดโดยใช้โปรแกรม ImageJ ด้วยเทคนิค Martin's diameter ซึ่งวัดจากขนาดของเกรน จะเห็นได้ว่ารูปที่ 4.13(a) ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาควัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem, 98%) มีขนาดเกรนอยู่ในช่วงประมาณ 0.74-1.60 μm และมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ

1.34 μm มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.55 μm ซึ่งมีขนาดเกรนใกล้เคียงกับผลของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ถูกเผาแคลไซน์เปลี่ยนให้เป็น Fe_2O_3 แสดงดังรูปที่ 4.12(b) มีขนาดเกรนอยู่ในช่วงประมาณ 0.54-1.60 μm และมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 μm มีการกระจายตัวแคบเมื่อเทียบกับ วัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารสารเคมี Fe_2O_3 ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.23 μm ในขณะที่วัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste มีขนาดเกรนอยู่ในช่วงประมาณ 0.91-3.74 μm และมีขนาดเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 1.92 μm โดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 μm แสดงดังรูปที่ 4.12(c) จะเห็นได้ว่า เกรนมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์จากสารเคมีและของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3 เป็นผลมาจากการในขั้นตอนการแคลไซน์ ขนาดอนุภาคของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste มีการหลอมเชื่อมติดกันเนื่องจากใช้เวลาในการเผาแคลไซน์นาน 5 ชั่วโมง ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ เมื่อนำวัสดุสังเคราะห์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มาอัดขึ้นรูปและเผาผนึกจึงทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามไปด้วย

4.3.2 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ หลังจากอัดขึ้นรูปและเผาผนึก โดยใช้เครื่อง BET



รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่อง BET วัสดุโครงสร้างเพอร์ออฟสไกต์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก (a) สารเคมี Fe_2O_3 (Ajax Finechem, 98%) (b) ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3 และ (c) Fe-waste

พื้นที่ผิวและรูพรุนสามารถศึกษาได้ด้วยเครื่อง BET (สุพะไชย์ จินดาอุฒิกุล, 2555) (M. Thommes, 2015) ซึ่งถือเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุที่จะนำไปใช้สำหรับตรวจจับแก๊ส เนื่องจากยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก พื้นที่ในการทำปฏิกิริยาก็ยิ่งมากขึ้น ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อแก๊สที่เข้าไปทำปฏิกิริยาก็ยิ่งสูงขึ้นตามไปด้วย จากผลการตรวจสอบของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.14 ผลปริมาณการดูดซับ-คายซับแก๊ส N_2 การเปรียบเทียบกับความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure; P/P_0) โดยการทำงานของ BET นั้นจะเริ่มจากการทำให้เกิดสุญญากาศก่อนแล้วจึงค่อย ๆ ปล่อยแก๊ส N_2 เข้าไปให้ตัวอย่างดูดซับ ซึ่งในช่วง P/P_0 ต่ำหรือเข้าใกล้ 0 (เมื่อ P คือความดันของระบบ และ P_0 คือความดันไออิ่มตัว โดยปกติคือความดันบรรยากาศ) ปริมาณการดูดซับแก๊สจะเกิดขึ้นบริเวณรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่า $2\ \mu\text{m}$ (Micropore) ซึ่งจากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในงานวิจัยนี้มีการดูดซับช่วงนี้น้อยมาก หมายความว่า มีรูพรุนชนิด Micropore น้อยมาก และเมื่อปล่อยให้ความดันของระบบสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับบริเวณรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่า $2\ \mu\text{m}$ (Mesopore) จน P/P_0 เข้าใกล้ 1 พบว่าปริมาณการดูดซับ-คายซับแก๊ส N_2 ของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ที่สังเคราะห์จากสารเคมีและของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น Fe_2O_3 นั้นใกล้เคียงกัน จากตารางที่ 4.1 เมื่อใช้วิธีการคำนวณของ Brunauer–Emmett–Teller (BET methods) (สุพะไชย์ จินดาอุฒิกุล, 2555) แสดงดังสมการที่ 11 จะมีพื้นที่ผิวสัมผัส 0.548 และ $0.522\ \text{m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/W[(P_0/P) - 1]$ กับ P/P_0 จะได้กราฟเส้นตรง t-Plot นำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการของ Kelvin ซึ่งถูกเสนอโดย Baarett-Joyner-Halenda (BJH methods) แสดงดังสมการที่ 12 (M. Thommes, 2015) จะทำให้ทราบปริมาตรและขนาดของรูพรุน นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาขนาดอนุภาค โดยอนุมานว่าอนุภาคนั้นเป็นทรงกลม คำนวณได้จากสมการของ Sauter mean diameter (SMD methods) แสดงดังสมการที่ 13 ในขณะที่วัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste มีการดูดซับ-คายซับที่ต่ำกว่า ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพียง $0.032\ \text{m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนน้อย ขนาดรูพรุนและอนุภาคใหญ่ สอดคล้องกับผล SEM ที่พบว่ามีการหลอมเชื่อมติดกันของเกรน ทำให้เกรนขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อยลง

$$1/W[(P_0/P) - 1] = [1/W_m C] - [(C-1)/W_m C] \quad (11)$$

โดย W = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ P/P_0
 W_m = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว

- P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะทำการทดลอง (mmHg)
 P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (mmHg)
 C = ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

$$\ln(P/P_0) = -2\gamma W_m / RT(r_p - t_c) \quad (12)$$

- โดย P = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะทำการทดลอง (mmHg)
 P_0 = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (mmHg)
 γ = แรงตึงผิวของของเหลว
 V_m = ปริมาตรโมลของของเหลว
 r = รัศมีความโค้งของผิวหน้าระหว่างของเหลว-แก๊ส
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$$\text{ขนาดอนุภาค} = 6000 / (\text{พื้นที่ผิว}_{\text{BET}} \times \text{ความหนาแน่น}) \quad (13)$$

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่อง BET

Synthetic materials	^a BET Surface Area (m ² /g)	^b Pore Volume (cm ³ /g)		^b Pore size (nm)	^c Particle Size (μm)
		t-Plot method (micropore)	BJH method (mesopore)		
LFO-Chemical	0.548	0.00007	0.02725	170.21	2.67
LFO-Fe ₂ O ₃ -Waste	0.522	0.00021	0.02838	162.53	2.89
LFO-Fe-Waste	0.032	0.00014	0.01864	202.86	38.87

^a คำนวณโดยใช้วิธีการของ Brunauer–Emmett–Teller (BET)

^b คำนวณโดยใช้วิธีการของ Baarett-Joyner-Halenda (BJH)

^c คำนวณโดยใช้วิธีการของ Sauter mean diameter (SMD)

4.3.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของวัสดุสังเคราะห์ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ

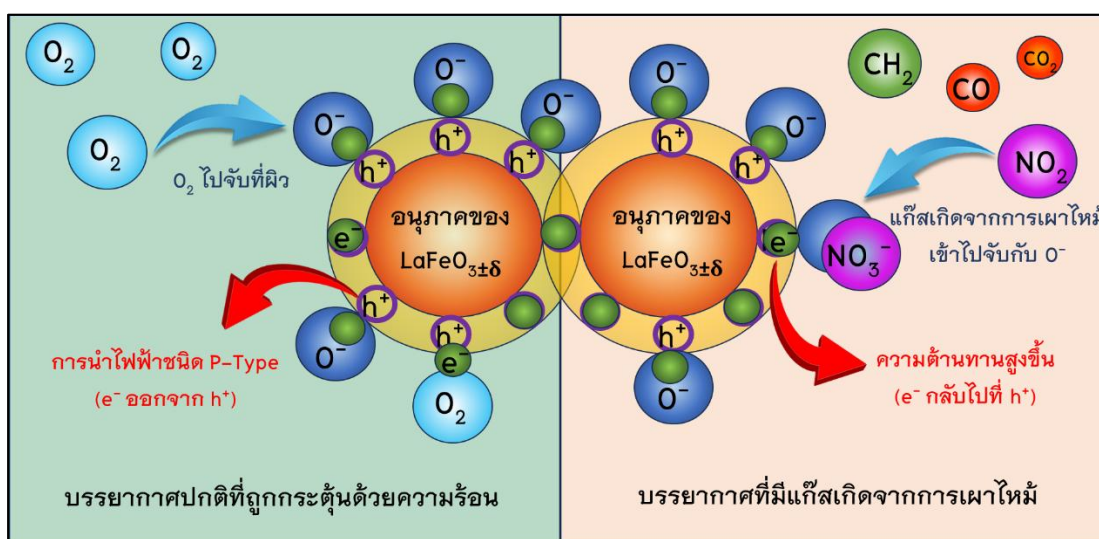
การตรวจสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส ด้วยวิธีการ 4-Point probe (F.M. Smits, 1958) โดยอาศัยหลักการนำไฟฟ้าของวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า ที่มีรูปแบบการนำไฟฟ้าด้วยประจุบวก (p^+) (Y. Zhang, 2016) จากรูปที่ 4.15 ในบรรยากาศปกติที่มีการกระตุ้นด้วยการให้ความร้อนกับวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ทำให้ O_2 ถูกดูดเข้าไปจับกับ e^- ที่บริเวณผิวอนุภาค ($\text{O}^- \text{O}_2^- \text{O}^{2-}$) บริเวณผิวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ด้วยกลไกทางไฟฟ้าเคมี ทำให้ Valence band มีช่องว่าง (Holes) ที่เป็นประจุบวก (h^+) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการนำไฟฟ้าแบบ P-Type โดยการนำไฟฟ้าจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้และปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสในการเกิดการแลกเปลี่ยน e^- กับ O_2 ด้วย และเมื่อปล่อยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติเข้าไป แก๊สเหล่านั้นจะเข้าไปจับกับ $\text{O}^- \text{O}_2^- \text{O}^{2-}$ ทำให้ e^- กลับไปยังบริเวณช่องว่าง h^+ ส่งผลให้ประจุรวมมีค่าเท่ากับศูนย์ (null) ค่าความต้านทานจึงสูงขึ้น หลักการนี้จึงเหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุตรวจจับแก๊สและใช้ทดสอบประสิทธิภาพการตอบสนองสัญญาณเซนเซอร์ต่อแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ โดยการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าในบรรยากาศปกติ (ρ_{Air}) เปรียบเทียบกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เมื่อปล่อยแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ (ρ_{Gass}) ซึ่งสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ 14 และคำนวณประสิทธิภาพการตอบสนองสัญญาณเซนเซอร์ได้จากสมการที่ 15 โดยค่าสัญญาณเซนเซอร์ที่ได้ควรมีค่ามากกว่า 1 เนื่องจากหลักการทำงานของวัสดุสังเคราะห์ ค่า ρ_{Gass} จะมีค่าสูงกว่า ρ_{Air} และจากการเกิดไฟไหม้ในช่วงเริ่มติดไฟก่อนจะลุกไหม้ใช้เวลาประมาณ 1-3 นาที อุณหภูมิช่วงนี้ประมาณ 100-300 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะกลายเป็นไฟไหม้รุนแรงได้ภายใน 5 นาที ซึ่งอุณหภูมิสูง 300-600 องศาเซลเซียส (International Organization for Standardization, 1975) จึงศึกษาที่อุณหภูมิ 100 150 และ 200 องศาเซลเซียส

$$\rho = (RA)/L \quad (14)$$

เมื่อ	ρ	คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า ($\Omega.m$)
	R	คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)
	V	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)
	L	คือ ระยะห่างระหว่าง 2 จุดที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (m)

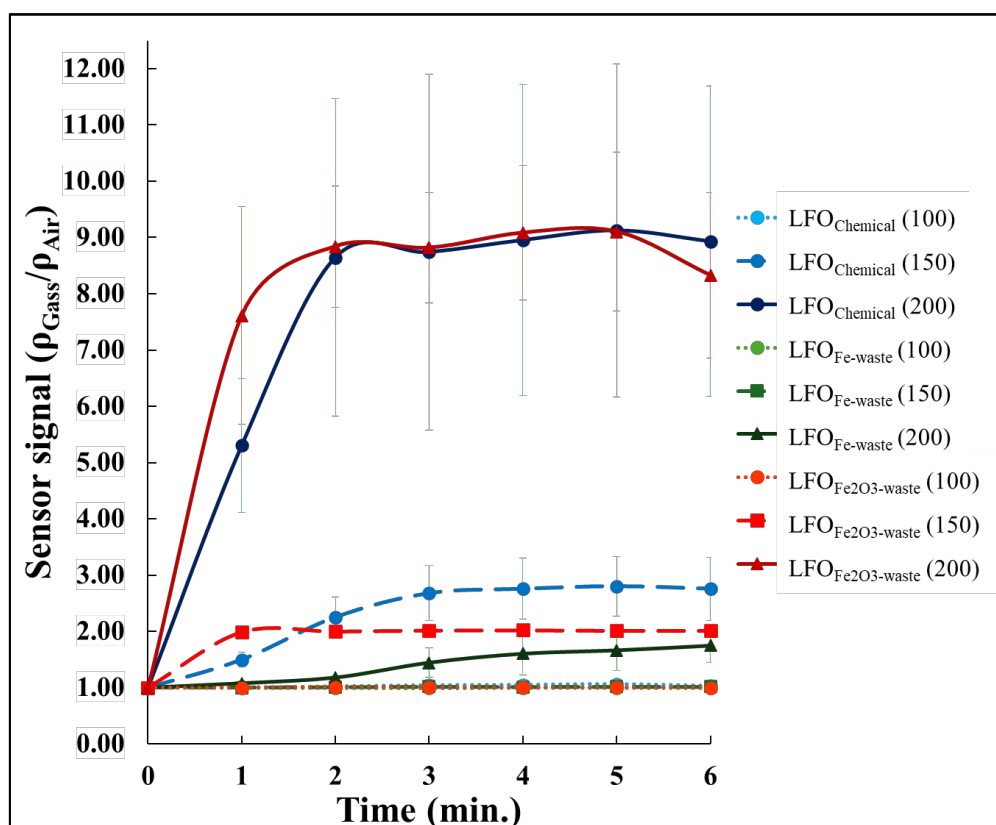
$$S = \rho_{\text{Gass}} / \rho_{\text{Air}} \quad (15)$$

เมื่อ S คือ ประสิทธิภาพการตอบสนองสัญญาณเซนเซอร์ (Sensor signal)
 ρ_{Gass} คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าเมื่อปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบ ($\Omega.m$)
 ρ_{Air} คือ ความต้านทานไฟฟ้าในอากาศที่ปกติ ($\Omega.m$)



รูปที่ 4.15 ภาพจำลองกลไกการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$

เนื่องจากเชื้อเพลิงธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ฟางข้าว ซึ่งแก๊สที่เกิดจากฟางข้าว ประกอบด้วย แก๊ส CO CO_2 CH_4 และ NO_2 เป็นหลัก (H. A. Le, 2020)(R. R. Romasanta, 2017) แต่ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดในการควบคุมความเข้มข้นของแก๊สในหน่วย ppm จึงกำหนดให้ใช้การเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ (ฟางข้าว) 100 กรัมต่อพื้นที่ 0.1 ลูกบาศก์เมตร เพื่อเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพเบื้องต้น ซึ่งไม่อาจทราบปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนของแก๊สแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามมาตรฐานในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์มีรายละเอียดแตกต่างกันตามการใช้งาน ขึ้นอยู่กับประเภท และความเข้มข้นของแก๊ส แต่ควรสามารถตรวจจับได้ในช่วงก่อนเกิดการลุกไหม้รุนแรง คือ มีช่วงอุณหภูมิทำงานที่ 100-300 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการตอบสนอง (Response Time) ต่อแก๊ส (ระยะเวลาที่เปลี่ยนจากสภาพต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นไปจนถึงสภาพต้านทานไฟฟ้าคงที่ค่าใหม่) ไม่เกิน 3 นาที และค่าสัญญาณเซนเซอร์ที่ได้ต้องมากกว่า 1



รูปที่ 4.16 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ในการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ

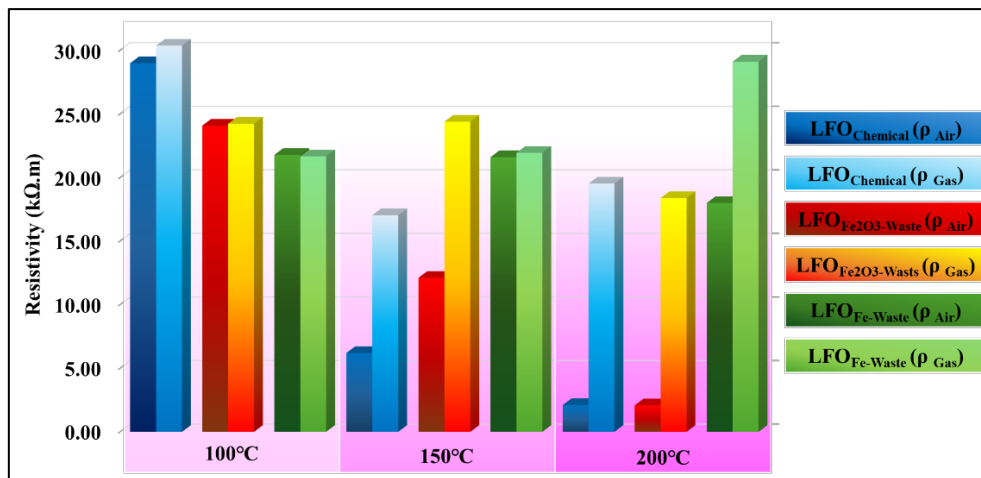
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการตอบสนองสัญญาณเซนเซอร์ โดยปริมาณไอน้ำในอากาศอยู่ในช่วง 30-40% และให้แรงดันไฟฟ้า 10 V แสดงผลดังรูปที่ 4.16 ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยเริ่มวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทุก ๆ 1 นาที โดยจะหยุดการวัดเมื่อค่าสภาพความต้านทานเริ่มคงที่อย่างน้อย 3 ค่า พบว่า ค่าสัญญาณเซนเซอร์ของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี จากของเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการแคลไซน์ให้มีสูตรเคมี Fe_2O_3 และ Fe-waste มีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 1.05 ± 0.01 1.01 ± 0.01 และ 0.99 ± 0.01 ตามลำดับ นั่นคือมีความสามารถในการตรวจจับแก๊สได้น้อยมาก ซึ่งหากสัญญาณเซนเซอร์ต่ำจะพบปัญหาเมื่อมีปัจจัยรบกวน เช่น ปริมาณไอน้ำในอากาศ (A.A. Alharbi, 2020) ซึ่งจะทำให้ค่าสัญญาณเซนเซอร์ต่ำลง ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับได้ ดังนั้น ค่าสัญญาณเซนเซอร์จึงควรมีค่าสูง เพื่อลดความผิดพลาดนี้ และใช้ระยะเวลาในการตอบสนอง 2 นาที

เมื่อศึกษาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ณ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าสัญญาณเซนเซอร์ของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี และจากของเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการแคลไซน์ให้มีสูตรเคมี Fe_2O_3 มีค่าสัญญาณเซนเซอร์สูงขึ้นเท่ากับ 2.65 ± 0.50 และ 2.01 ± 0.07 ตามลำดับ

และมีระยะเวลาในการตอบสนอง 2 นาที่ ในขณะที่ค่าสัญญาณเซนเซอร์ของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste มีค่าใกล้เคียงค่าเดิม คือ 1.02 ± 0.01 ระยะเวลาในการตอบสนอง 2 นาที่

เมื่อศึกษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นอีก ณ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสัญญาณเซนเซอร์วัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ มีค่าสูงขึ้นอย่างมาก จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้นในบรรยากาศปกติยิ่งกระตุ้นให้ O_2 ไปเกาะที่ผิวของ $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ มากขึ้น ส่งผลให้สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำลง เนื่องจากเกิดช่องว่างของ h^+ จำนวนมาก และเมื่อปล่อยแก๊สจากเชื้อเพลิงธรรมชาติเข้าไปจับกับ O^- O_2^- O^{2-} จะทำให้ e^- กลับไปยังบริเวณช่องว่าง h^+ ทำให้เกิด null มากขึ้นสภาพต้านทานไฟฟ้าก็ยิ่งกลับมาสูงขึ้นด้วย เมื่อการเพิ่มขึ้นของช่องว่าง ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าในบรรยากาศปกติมีค่าต่ำ และเมื่อปล่อยแก๊สจากเชื้อเพลิงธรรมชาติเข้าไปทำให้มีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ส่งผลให้ความแตกต่างของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังปล่อยแก๊สจากเชื้อเพลิงธรรมชาติเข้าไปมีมากขึ้น ทำให้ค่าประสิทธิภาพการตอบสนองสัญญาณเซนเซอร์สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปที่ 4.16 ณ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส วัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี มีค่าสัญญาณเซนเซอร์เท่ากับ 8.88 ± 2.89 และวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการแคลไซน์ให้มีสูตรเคมี Fe_2O_3 มีค่าสัญญาณเซนเซอร์เท่ากับ 8.84 ± 1.23 โดยใช้เวลาในการตอบสนอง 2 นาที่ ในขณะที่วัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste เป็นอย่างมาก ซึ่งมีค่าสัญญาณเซนเซอร์เพียง 1.67 ± 0.25 โดยใช้เวลาในการตอบสนอง 3 นาที่ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste มีค่าสัญญาณเซนเซอร์ต่ำ ประการหนึ่งเป็นผลมาจากการที่ไม่สามารถสังเคราะห์ให้เป็นวัฏภาคเดียว $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste ได้ และอีกประการหนึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับการตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่อง BET ซึ่งพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี และจากของเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการแคลไซน์ให้มีสูตรเคมี Fe_2O_3 นั้น มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จาก Fe-waste เป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นที่ชัดเจนว่าพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยามีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊ส

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการแคลไซน์ให้มีสูตรเคมี Fe_2O_3 มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์เป็นวัสดุสำหรับตรวจจับแก๊สเนื่องจากมีค่าสัญญาณเซนเซอร์สูงในช่วงอุณหภูมิใช้งานและระยะเวลาในการตอบสนองที่สามารถนำไปใช้งานได้ อีกทั้งยังเป็นการนำของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปริมาณของเสียและเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเสีย ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับสารเคมี



รูปที่ 4.17 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังปล่อยแก๊สจากเชื้อเพลิงธรรมชาติของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $\text{LaFeO}_{3\pm\delta}$ ณ อุณหภูมิ ต่าง ๆ