# สารบัญ

**หน้า**


บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ค
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ญ
**บทที่**
**1 บทนำ** ..... 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย ..... 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย ..... 3
1.4 ผลการวิจัยที่คาดหวังและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 4
**2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** ..... 5
2.1 ของเสียอุตสาหกรรมหรือกากอุตสาหกรรม ..... 5
2.1.1 กากอุตสาหกรรมที่ไม่เป็นอันตราย (Non - Hazardous waste) ..... 5
2.1.2 กากอุตสาหกรรมที่เป็นอันตราย (Hazardous waste) ..... 5
2.2 การจัดการของเสียอุตสาหกรรม ..... 6
2.2.1 การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse/Recycle/Recovery) ..... 6
2.2.2 การบำบัด (Treatment) ..... 6
2.2.3 การกำจัด (Disposal) ..... 6
2.3 ปริมาณของเสียในอุตสาหกรรมยานยนต์ ..... 7
2.4 วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ (Perovskite structure) ..... 9
2.5 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor) ..... 11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 15

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


**3 วิธีดำเนินการวิจัย** 32

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 32

3.2 วิธีการทดลอง 34

3.2.1 การจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 34

3.2.2 การเปลี่ยนสูตรเคมีของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยความร้อน 37

3.2.3 การสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 39

3.2.4 การตรวจสอบสมบัติวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ 41

**4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล 44**

**4.1** การจัดการของเสียและการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 44

4.1.1 การศึกษาปริมาณองค์ประกอบเคมีในของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์ 44

4.1.2 การตรวจสอบวัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 45

4.1.3 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสูตรเคมีของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ให้เป็น $Fe_2O_3$ โดยใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน 47

4.1.4 การตรวจสอบวัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์หลังผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 48

4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีชนิด $Fe_2O_3$ โดยใช้เครื่องวัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาค 51

4.1.6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 52

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**


4.2 การสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 53

4.2.1 การตรวจสอบอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาแคลไซน์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ โดยใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน 53

4.2.2 การตรวจสอบวัฏภาคของ $LaFeO_{3\pm\delta}$ หลังจากการเผาแคลไซน์สารตั้งต้น โดยใช้เครื่อง XRD 56

4.2.3 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภาคและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุสังเคราะห์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ โดยใช้เครื่อง PSD และ SEM 60

4.3 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์หลังการอัดขึ้นรูปและเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส 63

4.3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุสังเคราะห์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ หลังจากอัดขึ้นรูปและเผาผนึก โดยใช้เครื่อง SEM 63

4.3.2 การตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนของวัสดุสังเคราะห์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ หลังจากอัดขึ้นรูปและเผาผนึก โดยใช้เครื่อง BET 64

4.3.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของวัสดุสังเคราะห์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ในการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ 67

**5 สรุปและข้อเสนอแนะ** 72

5.1 สรุปผลการวิจัย 72

5.1.1 การจัดการของเสียและการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 72

5.1.2 การสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 72

5.1.3 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ 73

5.1.4 การประยุกต์ใช้วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ สำหรับตรวจจับแก๊ส 73

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**

5.2 ข้อเสนอแนะ 73
เอกสารอ้างอิง 75
ภาคผนวก 81
ภาคผนวก ก JCPDF 81
ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา 91
ประวัติผู้เขียน 102

# สารบัญตาราง

**ตารางที่** **หน้า**


2.1 สรุปการแจ้งรับกากของเสียเข้ามาในบริเวณโรงงาน โดยผู้รับกำจัด เดือนมกราคม-เดือนกรกฎาคม พ.ศ.2566 ..... 8

2.2 การจัดประเภทของแก๊สเซนเซอร์ในปี 1991 ของ IUPAC ..... 13

2.3 ประเภทของวัสดุและความสามารถในการตรวจจับแก๊สต่าง ๆ ..... 14

2.4 การทดสอบเพลิงไหม้ตามมาตรฐาน EN-54 และสารประกอบที่เป็นแก๊ส ..... 19

2.5 ค่าสัญญาณของเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับแก๊สในแต่ละประเภทของ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ที่ใช้อุณหภูมิเผาแคลไซน์ต่างกัน สำหรับความเข้มข้น 500 ppm ..... 21

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลอง ..... 32

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ..... 33

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ..... 34

4.1 แสดงผลการตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่อง BET ..... 66

# สารบัญรูป

**รูปที่** **หน้า**


2.1 ลักษณะการจัดการของเสียในประเทศไทย 7

2.2 ปริมาณของเสียอุตสาหกรรมผลิตยานพาหนะและอุปกรณ์ เดือนมกราคม-เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 9

2.3 โครงสร้างผลึกเพอรอฟสไกต์ 10

2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันของ Fe-O 10

2.5 ลักณะของเสีย Mill scale 15

2.6 องค์ประกอบทางเคมีของ Mill scale 16

2.7 องค์ประกอบทางเคมีของ Mill Scale ที่บำบัดด้วยแก๊สรีดิวซ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ 17

2.8 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วย XRD และองค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF 18

2.9 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ 19

2.10 ความต้านทานของเซนเซอร์โลหะออกไซด์ $SnO_2$ ระหว่างการทดสอบไฟต่าง ๆ และเหตุการณ์ที่มีอิทธิพลต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ 20

2.11 ความต้านทานที่สามารถวัดได้เมื่อทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊ส เมื่อความชื้นในอากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 150 และ 200 องศาเซลเซียส 22

2.12 อุณหภูมิในการใช้งานและความเข้มข้นที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแก๊สเซนเซอร์ 22

2.13 การกระจายขนาดของรูพรุนด้วยการวัดการดูดซับแก๊ส $N_2$ 23

2.14 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊ส HCHO ที่ความเข้มข้น 50 ppm ณ อุณหภูมิต่าง ๆ 24

2.15 ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแก๊สต่าง ๆ ที่ความเข้มข้น 50 ppm ณ อุณหภูมิเดียวกัน 24

2.16 กลไกการตรวจจับแก๊ส 25

2.17 (a) ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ (b) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย XRD (c) ผลการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy (d) ผลการวิเคราะห์ทางความร้อน 26

2.18 (a) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อัดขึ้นรูปของวัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ (b) โครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ (c) EDS สเปกตรัมของวัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ (d) แผนภาพระบุตำแหน่งองค์ประกอบเคมีของวัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ 27

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


2.19 (a) แผนผังโครงสร้างโมเลกุล $LaFeO_{3\pm\delta}$ และการเตรียมทดสอบตัวอย่าง (b) ภาพถ่ายเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความต้านทานตัวอย่าง (c) กลไกการตรวจจับแก๊สของวัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ (d) แผนผังการตั้งค่าการทดลองตรวจจับแก๊ส (e) ความต้านทานของเซนเซอร์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ในอุณหภูมิต่างๆ ..... 27

2.20 การตอบสนองต่อแก๊ส $CO_2$ ของวัสดุ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของแก๊สแตกต่างกัน ..... 28

2.21 ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสที่ความเข้มข้นของแก๊ส $CO_2$ ต่างกันในอากาศที่ไม่มีความชื้น ..... 29

2.22 แสดงผลการวัดค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ $LaFeO_3$ เมื่อดูดซับแก๊ส ..... 30

2.23 แสดงผลการตอบสนองต่อแก๊สผสม CO-$CH_4$ ของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ $LaFeO_{3\pm\delta}$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันโดยใช้อิเล็กโทรดชนิดทองคำ ..... 30

3.1 แผนภาพขั้นตอนการจัดการของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ..... 34

3.2 เครื่อง X-ray fluorescence ผู้ผลิต Horiba รุ่น XGT-5200WR ..... 35

3.3 เครื่อง X-Ray Diffusion ผู้ผลิต Bruker รุ่น D2 Phaser ..... 36

3.4 เครื่อง Particlesize distribution ผู้ผลิต Horiba รุ่น LA-950V2 ..... 36

3.5 เครื่อง Scanning Electron Microscope ผู้ผลิต JEOL รุ่น JCM-5000 ..... 37

3.6 ขั้นตอนการเปลี่ยนสูตรเคมีของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยความร้อน ..... 38

3.7 เครื่อง Simultaneous Thermal Analysis (TGA/DSC) ..... 39

3.8 ขั้นตอนการสังเคราะห์วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ..... 40

3.9 ขั้นตอนตรวจสอบสมบัติวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ..... 41

3.10 Brunauer-Emmett-Teller method ผู้ผลิต Micromeritics รุ่น 3Flex ..... 42

3.11 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีการ 4-Point method ..... 43

3.12 ส่วนประกอบและการต่อวงจรไฟฟ้า เพื่อใช้วัดประสิทธิภาพในการตรวจจับแก๊สโดยเทคนิค 4-point method ..... 43

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**


4.1 ผลการวิเคราะห์ธาตุโดยเครื่อง XRF ของเสียก่อน-หลังผ่านการจัดการและสารเคมีชนิด $Fe_2O_3$ ..... 45

4.2 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคด้วยเครื่อง XRD ในของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีชนิด $Fe_2O_3$ ..... 46

4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยเครื่อง STA ของของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการจัดการของเสีย ..... 47

4.4 ผลการวิเคราะห์วัฏภาคของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง XRD ..... 49

4.5 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีชนิด $Fe_2O_3$ โดยใช้เครื่อง PSD ..... 51

4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของเสียจากอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์และสารเคมีโดยใช้กล้อง SEM ..... 52

4.7 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยเครื่อง STA ของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จาก Fe ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ..... 54

4.8 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนโดยเครื่อง STA ของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น $Fe_2O_3$ ด้วยวิธีทางความร้อน ..... 55

4.9 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากสารเคมี $Fe_2O_3$ ..... 58

4.10 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จากของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่เปลี่ยนเป็น $Fe_2O_3$ ..... 59

4.11 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงวัฏภาคของวัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ จาก Fe ของเสียอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ..... 60

4.12 ผลการตรวจสอบนาดอนุภาคและโครงสร้างจุลาคด้วยเครื่อง PSD และ SEM ของวัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ..... 62

4.13 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลาคด้วยเครื่อง SEM ของวัสดุสังเคราะห์โครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ..... 63

# สารบัญรูป (ต่อ)

**รูปที่** **หน้า**

4.14 ผลการตรวจสอบพื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเครื่อง BET วัสดุโครงสร้างเพอรอฟสไกต์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ..... 64
4.15 ภาพจำลองกลไกการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ..... 68
4.16 ผลการตรวจสอบประสิทธิภาพของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ในการตรวจจับแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงธรรมชาติ ..... 69
4.17 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าก่อนและหลังปล่อยแก๊สจากเชื้อเพลิงธรรมชาติของวัสดุสังเคราะห์ชนิด $LaFeO_{3\pm\delta}$ ณ อุณหภูมิ ต่าง ๆ ..... 71