นวัตกรรม
ในวงการอุตสาหกรรม

INDUSTRY INNOVATION



ผศ.อภิชิต เสมศรี

นวัตกรรมในวงการอุตสาหกรรม

(Industry Innovation)

สำหรับนักศึกษา นักวิจัย วิศวกร และผู้สนใจด้าน
นวัตกรรมในวงการอุตสาหกรรม

โดย ผศ.อภิชิต เสมศรี

พิมพ์ครั้งที่ 1

ชื่อหนังสือ : นวัตกรรมในวงการอุตสาหกรรม
(Industry Innovation Laboratory)

ชื่อผู้แต่ง : ผศ.อภิชิต เสมศรี

จัดทำโดย : ผศ.อภิชิต เสมศรี

พิมพ์ครั้งที่ : 1

จัดจำหน่ายโดย : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับนักศึกษา นักวิจัย วิศวกร และผู้สนใจด้านนวัตกรรมในวงการอุตสาหกรรม

สงวนสิทธ์ในประทศไทยตามพระราชบัญญัติ ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537

ราคา 650 บาท

ISBN (e-book) : 978-616-637-902-0

ขอสงวนสิทธิ์ ห้ามไม่ให้ผู้ใดนำส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของหนังสือเล่มนี้ ทำการคัดลอกเพื่อนำไปแจกจ่ายต่อในเชิงพาณิชย์

คำนำ

ตำราเรียนวิชา **นวัตกรรมในวงการอุตสาหกรรม (Industry Innovation Laboratory)** เล่มนี้ จัดทำและเรียบเรียงขึ้นอย่างเป็นระบบ เพื่อใช้เป็นตำราหลักประกอบการเรียนการสอนสำหรับนักศึกษา ตลอดจนใช้เป็นแหล่งอ้างอิงทางวิชาการสำหรับอาจารย์ ผู้เชี่ยวชาญ และผู้ที่สนใจทั่วไปในด้านเทคโนโลยีและนวัตกรรมอุตสาหกรรม

เนื้อหาภายในเล่มมุ่งเน้นการเสริมสร้างความรู้และความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับ **เทคโนโลยีและนวัตกรรมเปลี่ยนโลก (Disruptive Innovation)** ซึ่งมีบทบาทสำคัญยิ่งในการขับเคลื่อนภาคอุตสาหกรรมยุคใหม่ ตั้งแต่การปรับตัวเข้าสู่ระบบการผลิตอัจฉริยะ เทคโนโลยีวัสดุขั้นสูง ระบบพลังงานหมุนเวียน เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน ตลอดจนมิติด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนทางสังคม โดยแบ่งเค้าโครงเนื้อหาออกเป็น 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 โรงงานอัจฉริยะสำหรับอุตสาหกรรม 4.0 (Smart Factory for Industry 4.0)

ศึกษาบริบทการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่สี่ (Fourth Industrial Revolution) หลักการออกแบบระบบอุตสาหกรรม มิติของโลกาภิวัตน์ เทคโนโลยีขับเคลื่อนหลัก (IIoT, Big Data, AI, Cloud, Cybersecurity, Digital Twin) แนวคิดการผลิตอัจฉริยะ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID ความท้าทายในการปรับใช้ในองค์กร ช่องว่างงานวิจัย และทิศทางในอนาคต

บทที่ 2 อนุภาคนาโนในภาคอุตสาหกรรม (Industrial Applications of Nanoparticles)

ศึกษาพื้นฐานทางนาโนเทคโนโลยี การจำแนกประเภทของอนุภาคนาโน การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนในภาคอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ข้อควรระวังด้านความเป็นพิษ ผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม พร้อมบทสรุปเชิงวิชาการ

บทที่ 3 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy Systems)

ศึกษาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ ความก้าวหน้าและแนวโน้มในอนาคต มิติด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) เทคโนโลยีการบูรณาการและการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงแบตเตอรี่ การบริหารจัดการพลังงาน เทคโนโลยีเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยีเกิดใหม่ รวมถึงเทคโนโลยีระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำ (Floating PV)

บทที่ 4 พลังงานลม (Wind Energy Systems)

ศึกษาข้อดีและข้อจำกัดของพลังงานลม การประเมินศักยภาพและก พลังงานลม การวิเคราะห์ผลผลิตพลังงานจากกังหันลม ระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุม และฮาร์ดแวร์ส่วนประกอบของกังหันลมเชิงวิศวกรรม

บทที่ 5 พลังงานน้ำ (Hydro Power Systems)

ศึกษาบทบาทของพลังงานน้ำในการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด มิติด้านความยั่งยืน การประเมินศักยภาพทรัพยากรพลังงานน้ำเพื่อการพัฒนา การพัฒนาพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Small Hydro) และบทบาทของพลังงานน้ำในโครงสร้างตลาดไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง

บทที่ 6 พลังงานฟลายวีล (Flywheel Energy Storage Systems)

ศึกษาเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานรูปแบบต่างๆ หลักการทำงาน องค์ประกอบ และตัวแปลงพลังงานไฟฟ้าของระบบฟลายวีล การประยุกต์ใช้งานเชิงพาณิชย์ ความสำเร็จและความท้าทาย ทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์ การวิเคราะห์รูปทรงโรเตอร์ (ทรงกระบอก ทรงกลม ดิสก์ทรงกรวย และการดัดงอแบบดัมเบล) พฤติกรรมเชิงกลศาสตร์เปรียบเทียบ รวมถึงกรณีศึกษาและตัวอย่างต้นแบบสาธิตการออกแบบโรเตอร์สำหรับที่อยู่อาศัย

บทที่ 7 สิ่งแวดล้อมและสังคม (Environmental and Social Issues in Industry)

ศึกษาผลกระทบจากภาวะโลกร้อนและก๊าซเรือนกระจก มลพิษทางอากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บทบาทของพลังงานหมุนเวียน สถานการณ์พลังงานและทางเลือกในการผลิตไฟฟ้า/เชื้อเพลิงภาคการขนส่ง ประเด็นสิ่งแวดล้อม การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) และมิติทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ตำราเล่มนี้จะอำนวยประโยชน์และสร้างรากฐานความรู้ทางวิชาการที่เข้มแข็งให้แก่ผู้เรียนและผู้ประยุกต์ใช้งาน หากผู้ทรงคุณวุฒิหรือผู้อ่านท่านใดมีข้อเสนอแนะเชิงวิชาการ ผู้เขียนยินดีน้อมรับข้อคิดเห็นต่างๆ เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขให้ตำรามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป และขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ผศ.อภิชิต เสมศรี
สาขาวิชา เทคโนลียีวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรม
มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 โรงงานอัจฉริยะสำหรับอุตสาหกรรม 4.0 (Smart Factory for Industry 4.0) 1

1.1 บทนำ 1

1.2 อุตสาหกรรม 4.0 และการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่สี่ 2

1.3 หลักการออกแบบของอุตสาหกรรม 4.0 4

1.4 มิติของโลกาภิวัตน์ 5

1.5 เทคโนโลยีของอุตสาหกรรม 4.0 7

1.6 การผลิตสำหรับอุตสาหกรรม 4.0 19

1.7 การผลิตอัจฉริยะ 20

1.8 โรงงานอัจฉริยะ 30

1.9 เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี 34

1.10 ความท้าทายในการนำ Industry 4.0 ไปใช้ 37

1.11 ช่องว่างงานวิจัยและทิศทางในอนาคต 44

1.12. บทสรุป 46

แบบฝึกหัด บทที่ 1 49

บรรณานุกรม 58

บทที่ 2 อนุภาคนาโนในภาคอุตสาหกรรม (Industrial of Nanoparticles) 63

2.1 บทนำ 63

2.2 การจำแนกประเภทของอนุภาคนาโน 64

2.3 การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนตามการจำแนกประเภท 97

2.4 ความเป็นพิษ 127

2.5 บทสรุป 139

แบบฝึกหัด บทที่ 2 141

บรรณานุกรม 148

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) 201

3.1 บทนำ 201

3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ 203

3.3 ความก้าวหน้าและแนวโน้มทางเทคโนโลยี 219

3.4 เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม 241

3.5 วงจรชีวิตเซลล์แสงอาทิตย์ 245

3.6 เทคโนโลยีการบูรณาการไฟฟ้าและการกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ 265

3.7 เทคโนโลยีการจัดเก็บไฟฟ้า 274

3.8 เทคโนโลยีการจัดเก็บคุณภาพไฟฟ้า 275

3.9 เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานแบบเชื่อมโยงแบตเตอรี่ 278

3.10 เทคโนโลยีการจัดเก็บการบริหารจัดการพลังงาน 285

3.11 เทคโนโลยีเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่ 290

3.12 การใช้งาน 338

3.13 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำ – Sara Golroodbari, Vasilis Fthenakis และ Wilfried GJHM van Sark 368

แบบฝึกหัด บทที่ 3 415

บรรณานุกรม 422

บทที่ 4 พลังงานลม (Wind Energy) 476

4.1 บทนำ 476

4.2 ข้อดีและข้อเสียของพลังงานลม 480

4.3 ศักยภาพของพลังงานลม (การวัด, การประเมิน, การพยากรณ์) 482

4.4 ผลผลิตพลังงานจากกังหันลมในปัจจุบัน 518

4.5 ส่วนประกอบไฟฟ้า, ระบบควบคุม และอิเล็กทรอนิกส์พลังงานของกังหันลม 588

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6 ฮาร์ดแวร์ 644
4.7 บทสรุป 649
แบบฝึกหัด บทที่ 4 651
บรรณานุกรม 658

บทที่ 5 พลังงานน้ำ (Hydro power) 690
5.1 บทนำ 690
5.2 การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดและบทบาทของพลังงานน้ำในอนาคต 694
5.3 ความยั่งยืน 699
5.4 การประเมินทรัพยากรพลังงานน้ำ: ศักยภาพในการพัฒนาเพิ่มเติม 708
5.5 พลังงานน้ำขนาดเล็ก 732
5.6 บทบาทของพลังงานน้ำในตลาดไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง 764
5.7 บทสรุป 787
แบบฝึกหัด บทที่ 5 789
บรรณานุกรม 796

บทที่ 6 พลังงานฟลายวีล (Flywheel Energy) 801
6.1 บทนำ 801
6.2 ระบบกักเก็บพลังงานประเภทต่าง ๆ 803
6.3 หลักการทำงานและองค์ประกอบของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 806
6.4 ตัวแปลงพลังงานไฟฟ้า 822
6.5 การประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 825
6.6 ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเชิงพาณิชย์ 831

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.7 ความสำเร็จ ความท้าทาย แนวโน้มในอนาคต 833
6.8 กรณีศึกษา 839
6.9 พื้นฐานทางฟิสิกส์ในระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 844
6.10 การเปรียบเทียบการออกแบบฟลายวีลการดัดงอแบบดัมเบล กับฟลายวีลมาตรฐาน 855
6.11 อิทธิพลของรูปร่างวัตถุแข็งทรงกระบอก 860
6.12 การเปรียบเทียบกลไกการพลิกตัวของแมวที่กำลังตก 864
6.13 กรณีศึกษาตัวอย่างต้นแบบสาธิตของฟลายวีล 866
6.14 พลังงานจลน์การหมุนสำหรับฟลายวีลขอบหนาและแบบดิสก์ทรงกรวย 871
6.15 กรณีศึกษา การออกแบบการทดลองโรเตอร์ฟลายวีลสำหรับระบบกักเก็บพลังงานด้วย ฟลายวีลเพื่อการใช้งานในที่อยู่อาศัย 878
แบบฝึกหัด บทที่ 6 923
บรรณานุกรม 930

บทที่ 7 สิ่งแวดล้อมและสังคม (Environmental and Social Issues) 955
7.1 บทนำ 955
7.2 ภาวะโลกร้อนและบทบาทของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) 956
7.3 มลพิษในบรรยากาศ, ก๊าซเรือนกระจก, และการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ 959
7.4 พลังงานทดแทนและดวงอาทิตย์ 961
7.5 สถานการณ์พลังงานในปัจจุบัน 963
7.6 ตัวเลือกสำหรับการผลิตไฟฟ้า 964
7.7 ตัวเลือกเชื้อเพลิงสำหรับภาคการขนส่ง 967
7.8 ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมของพลังงานหมุนเวียน 969
7.9 การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของพลังงานหมุนเวียน 979
7.10 มิติทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมของพลังงานหมุนเวียน 1012

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
แบบฝึกหัด บทที่ 7	1030
บรรณานุกรม	1038
ดัชนี	1054
ประวัติผู้เขียน	1072

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2-1 อนุภาคนาโน (NPs) จำแนกตามสมบัติเด่นและขอบเขตการประยุกต์ใช้ 76
2-2 การประยุกต์ใช้ของอนุภาคนาโนอินทรีย์ 99
2-3 การประยุกต์ใช้นาโนอนุภาคฐานคาร์บอน 115
3-1 วงจรชีวิตสินค้าคงคลังพื้นหน้าสำหรับการผลิต 1 ตารางเมตร ของความสมดุลของระบบแบบเอียงคงที่ 248
3-2 วงจรชีวิตของความสมดุลของหลังคาของระบบ 249
3-3 การปล่อย Cd ในชั้นบรรยากาศโดยตรงในช่วงวงจรชีวิตของโมล CdTe PV 262
3-4 หมวดหมู่ของเทคโนโลยีการจัดเก็บไฟฟ้า 274
3-5 ประมาณการค่าใช้จ่ายโดยสถาบันวิจัยพลังงานไฟฟ้า 286
3-6 ค่าสะท้อนกลับภายใน และความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิวด้านหลัง 313
3-7 ตัวอย่างของโมลโฟโตโวลตาอิก (PV modules) ที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน 350
3-8 ศักยภาพพลังงานและพลังงานจาก FPV ทั่วโลก 375
3-9 การแยกราคาสำหรับระบบ FPV ขนาด 1.1 เมกะวัตต์-พีก ในไต้หวัน โดยอ้างอิงจากเอกสารภายในของ Ciel & Terre 379
4-1 การจำแนกประเภทพลังงานลมสำหรับศักยภาพในการผลิตพลังงานลม 506
4-2 การจำแนกการพยากรณ์ความเร็วลมและพลังงานตามขอบเขตของการทำนาย 514
4-3 การเปลี่ยนแปลงของความยาวมอนิน โอบูคอฟฟ์ "L" 561
4-4 ข้อมูลทางเทคนิคของ DeWind 8.2 617
4-5 ข้อมูลทางเทคนิคของ AREVA Multibrid M5000 629
4-6 ประสิทธิเกี่ยวข้องกับโครงข่ายไฟฟ้าของกังหันลม 632
5-1 การเปรียบเทียบประเด็นด้านความยั่งยืนและหลักการด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล 707
5-2 การประมาณค่าศักยภาพพลังงานน้ำของโลกจากการศึกษาต่าง ๆ 721
5-3 ศักยภาพพลังงานน้ำในระดับภูมิภาคและระดับโลก ตามการจำแนกนิยามสามประเภท 722

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

5-4 สัดส่วนของศักยภาพพลังงานน้ำที่สามารถพัฒนาได้ในเชิงเทคนิค และเชิงเศรษฐกิจ ซึ่งได้รับการพัฒนาแล้ว 723

5-5 ศักยภาพพลังงานน้ำที่ยังไม่ได้รับการพัฒนา ณ ปี ค.ศ. 2019 723

5-6 ประเทศที่มีศักยภาพพลังงานน้ำที่ยังไม่ได้รับการพัฒนาสูงสุด 10 อันดับแรก 724

5-7 นิยามของโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก ในระดับโลก โดยพิจารณาจากกำลังการผลิตติดตั้ง 734

5-8 ศักยภาพและกำลังการผลิตติดตั้งของไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กทั่วโลก (≤10 เมกะวัตต์) 737

5-9 การเปรียบเทียบแนวทางการประเมินศักยภาพทรัพยากรพลังงานน้ำ 739

5-10 วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์จากข้อมูลการสำรวจ 742

5-11 เกณฑ์การเลือกกังหันน้ำตามค่าความเร็วจำเพาะ อ้างอิงตามมาตรฐานอินเดีย 754

5-12 ระดับช่วงเวลาของความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้า 770

5-13 ระยะของการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนที่มีความแปรผัน ในระบบไฟฟ้า 773

5-14 สรุปประเภทของบริการความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้า จำแนกตามช่วงเวลา 776

6-1 การเปรียบเทียบวิธีการกักเก็บพลังงานหลักและคุณลักษณะสำคัญ 804

6-2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของมอเตอร์ทั้งสามประเภท 809

6-3 คุณลักษณะของตลับลูกปืนแม่เหล็กแบบเดี่ยวทั้งสามประเภท 819

6-4 สรุประบบกักเก็บพลังงานฟลายวีลเชิงพาณิชย์ 831

6-5 การประยุกต์ใช้งานและข้อได้เปรียบของการใช้ระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 832

6-6 สรุป ความสำเร็จและความท้าทายของระบบกักเก็บพลังงานฟลายวีล 833

6-7 โมเมนต์ความเฉื่อยหลักของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของต้นแบบสาธิต 869

6-8 การเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์และเฟรม พร้อมอัตราส่วนความเร็วที่สอดคล้อง กันสำหรับช่วงการเร่งและช่วงการเบรกของโรเตอร์ 870

6-9 ค่าปัจจัยรูปร่าง K สำหรับรูปทรงที่มีความเค้นระนาบแตกต่างกัน 876

6-10 ข้อมูลลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ทั่วไปสำหรับโรเตอร์ 877

6-11 ค่าพารามิเตอร์การออกแบบ 888

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

6-12 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณของฟลายวีล 892
6-13 สมบัติเชิงกลของวัสดุ 895
6-14 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างฟลายวีลดิสก์ทรงกรวยกับฟลายวีลขอบหนา 904
6-15 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ทดสอบ 907
6-16 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการกักเก็บพลังงาน ความเร็วของฟลายวีลและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟลายวีลขอบหนา 909
6-17 ผลการทดลองเปรียบเทียบเวลาในการกักเก็บพลังงาน ความเร็วของฟลายวีลและแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 910
6-18 ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 912
6-19 การเปรียบเทียบผลการทดลองของพลังงานจลน์ ความเร็วเชิงมุมและความเร็วการหมุนของฟลายวีลระหว่างฟลายวีลขอบหนาและฟลายวีลดิสก์ทรงกรวย 917
6-20 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์ต้นทุน 921
7-1 สมบัติของก๊าซเรือนกระจกบางชนิด ที่เกี่ยวข้องกับภาวะโลกร้อน 960
7-2 สัดส่วนการผลิตพลังงานไฟฟ้าทั่วโลกทั้งหมดในปี 2018 963
7-3 สัดส่วนการบริโภคพลังงานทั่วโลกทั้งหมดในปี 2018 964
7-4 สัดส่วนการผลิตไฟฟ้า ณ เดือนมิถุนายน 2019 965
7-5 ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมและสังคมจากการพัฒนาและการใช้พลังงานหมุนเวียน 985
7-6 ตัวอย่างบัญชีรายการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ของกังหันลมบนบก 991

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

7-7 ประเภทของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่ใช้กันทั่วไปในการประเมินวัฏจักรชีวิต 992
7-8 การคำนวณศักยภาพการก่อภาวะโลกร้อน จากข้อมูลบัญชีการปล่อยก๊าซเรือน กระจกของระบบกังหันลม 994

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

1-1 เส้นทางการปฏิวัติอุตสาหกรรม 3

1-2 การจำแนกประเภทของอุตสาหกรรม 4.0 6

1-3 ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง 9

1-4 การไหลของข้อมูลระหว่างโลกกายภาพและโลกไซเบอร์ 12

1-5 โครงสร้างลำดับชั้นของการแยกส่วนอัตโนมัติร่วมกับบริการแบบกระจายตัว 15

1-6 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับเครื่องจักรในระบบไซเบอร์–กายภาพ 16

1-7 โรงงานอัจฉริยะ 31

1-8 สถาปัตยกรรมของเซนเซอร์อัจฉริยะ 34

2-1 แผนผังแสดงภาพแทนของอนุภาคนาโน 64

2-2 การจำแนกประเภทของอนุภาคนาโน 65

2-3 การจำแนกประเภทและชนิดย่อยของอนุภาคนาโนอนินทรีย์ 66

2-4 การจำแนกประเภทและชนิดย่อยของอนุภาคนาโนฐานคาร์บอน 71

2-5 การจำแนกประเภทและชนิดย่อยของอนุภาคนาโนอินทรีย์ 80

2-6 การประยุกต์ใช้อนุภาคนาโน 98

2-7 กลไกการเกิดความเป็นพิษของอนุภาคนาโน 130

3-1 การจัดส่งทั่วโลกในช่วงปี 2006 ถึง 2020 จำแนกตามเทคโนโลยี PV 202

3-2 ปริมาณการส่งออกเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วโลกประจำปีในช่วงปี 2001 ถึง 2020 โดยแบ่งตามประเทศหรือภูมิภาคต้นทาง ในปี 2020 ปริมาณการส่งออกเพิ่มขึ้นประมาณ 6% เมื่อเทียบกับปี 2019 ซึ่งน้อยกว่าอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีที่ประมาณ 25% ที่เกิดขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา สาเหตุหลักมาจากผลกระทบของการแพร่ระบาดของโควิด 19 204

3-3 ให้เห็นถึงความก้าวหน้าจากการเริ่มต้นโครงการแบตเตอรี่แสงอาทิตย์ ผ่านการค้นพบและการสาธิตในห้องปฏิบัติการจนถึงการใช้งานจริงในสนาม รูปถ่ายแสดงการติดตั้งโมลแรกในเมืองอเมริคัส รัฐจอร์เจีย จากนิทรรศการของ NREL ที่เฉลิมฉลองครบรอบ 50 ปี ของการค้นพบเซลล์แสงอาทิตย์โดย Bell Telephone Laboratories 206

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-4 (A) ดาวเทียม Vanguard I เป็นทรงกลมอะลูมิเนียมขนาด 1.47 กิโลกรัม เส้นผ่านศูนย์กลาง 15.2 เซนติเมตร (B) ดาวเทียมนี้ติดตั้งเครื่องส่งสัญญาณขนาด 10 มิลลิวัตต์ ที่ใช้แบตเตอรี่ปรอท (ความถี่ 108 MHz) และเครื่องส่งสัญญาณขนาด 5 มิลลิวัตต์ (ความถี่ 108.03 MHz) ซึ่งใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ 6 ชุดที่ติดตั้งบนตัวดาวเทียม นอกจากนี้ ยังมีเสาอากาศสั้น 6 ต้นยื่นออกจากตัวดาวเทียม เครื่องส่งสัญญาณดังกล่าวถูกใช้หลัก 208

3-5 วิทยุ AM พลังงานแสงอาทิตย์ของ Hoffman Electronics ผลิตขึ้นในช่วงปี 1958–59 ด้านบนของวิทยุมีเซลล์แสงอาทิตย์แบบแบ่งเป็นสี่ส่วนจำนวน 10 ชิ้น (จากอุปกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร) วิทยุเครื่องนี้สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ปรอทหรือเซลล์แสงอาทิตย์ โดยควบคุมผ่านสวิตช์ที่ด้านข้างของเครื่อง ที่มาจากคอลเลกชันของผู้เขียน 209

3-6 โฆษณาของ Hoffman Electronics แสดงของเล่นหลากหลายชนิด เซลล์แสงอาทิตย์ และวิทยุ ในช่วงทศวรรษ 1960 ที่น่าสนใจคือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกจำหน่ายในราคาประหยัด 7 เซนต์ต่อมิลลิวัตต์ ซึ่งเทียบเท่ากับประมาณ 63 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ ในปัจจุบัน 210

3-7 สิ่งพิมพ์ "SPAN" ของ Hoffman Electronics ในช่วงปลายทศวรรษ 1950 และต้นทศวรรษ 1960 (A) การเลือกหน้าปกและ (B) ตัวอย่างบทความและประกาศที่เน้นผลิตภัณฑ์และการพัฒนา PV ของตน 210

3-8 การประชุมเชิงปฏิบัติการเกี่ยวกับการแปลงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ของพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการใช้งานภาคพื้นดินที่จัดขึ้นที่เมืองเชอร์รี่ฮิลล์รัฐนิวเจอร์ซีย์ วันที่ 23-25 ตุลาคม พ.ศ. 2516 เพื่อจัดโครงการภาคพื้นดินของสหรัฐฯ (A) การดำเนินการของการประชุมเชิงปฏิบัติการครอบคลุม การออกแบบแนวคิดสำหรับ (B) ระบบไฟฟ้า PV ชุมชน (C) ระบบไฟฟ้า PV อุตสาหกรรม (D) ระบบไฟฟ้า PV ในเมืองแบบกระจาย และ ฟาร์มพลังงานแสงอาทิตย์ PV 211

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-9 เหตุการณ์สำคัญที่เผยแพร่เป็นแนวทางฉันทามติของผู้เชี่ยวชาญสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ภาคพื้นดินของสหรัฐฯ จากสรุปการประชุมเชิงปฏิบัติการ Cherry Hill สำหรับโครงการ PV ของสหรัฐอเมริกา 212

3-10 ราคา PV ในช่วงปี 1977-2020 (ในสกุลเงิน USD ของปีเฉพาะ) 215

3-11 ประเทศต้นทางสำหรับการจัดส่ง PV เปรียบเทียบปี 2019 และ 2020 215

3-12 การจัดส่งทั่วโลกในช่วงปี 2006 ถึง 2020 จัดหมวดหมู่ตามเทคโนโลยี PV (Mints, 2021) การครอบงำของ Si นั้นชัดเจน 216

3-13 ผู้ผลิตชั้นนำของโลกตามการจัดส่งสำหรับปี 2020 โปรดทราบว่ามีรายชื่อผู้ผลิต "10 อันดับแรก" หลายราย ทั้งตามการจัดส่งและกำลังการผลิต 216

3-14 วิวัฒนาการของ PV แบบสแตนด์อโลนเป็นแบบเชื่อมต่อกริดในช่วงปี 1982-2020 217

3-15 การติดตั้ง PV สะสมทั่วโลกจนถึงปี 2020 สรุปประเทศชั้นนำ การติดตั้งสะสมที่รายงานแตกต่างกันไประหว่าง 720 ถึง 770 กิกะวัตต์ จนถึงปี 2020 218

3-16 การกระจายเทคโนโลยี PV ที่จัดส่งในช่วงปี 2020 ข้อมูลแสดงให้เห็นถึงความโดดเด่นอย่างต่อเนื่องของ Si และในบรรดาสิ่งเหล่านี้ แนวโน้มอย่างต่อเนื่องในการใช้โมโนคริสตัลไลน์ Si ก็เห็นได้ชัดเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีการบ่งชี้เบื้องต้นของความสนใจที่เพิ่มขึ้นในโมล TOPCon เชิงพาณิชย์ 220

3-17 การแสดงหน้าตัดของ (A) ปีนการผสมผสานระหว่างการเคลือบพื้นผิวแผ่นเวเฟอร์ด้านหลังและหน้าสัมผัสด้านหลังเฉพาะที่ PERC (B) เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นไฟฟ้า (PERT) และ (C) เซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบใหม่ที่ใช้ชั้นอุโมงค์ออกไซด์บางๆ (TOPCon) 221

3-18 เทคโนโลยีไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สองหน้า (A) หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์สองหน้า (B) โมลแสดงพื้นผิวด้านหน้าและด้านหลัง และ (C) อาร์เรย์สองหน้าที่ปรับใช้ภาคสนาม 223

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-19 การแสดงหน้าตัดของ (A) เซลล์แสงอาทิตย์ HIT (Si Heterojunction) ที่พัฒนาโดย Sanyo และ (B) เซลล์แสงอาทิตย์ IBC ที่ออกแบบในช่วงต้น 224

3-20 แนวคิด PV ย้อนยุค เซลล์แสงอาทิตย์แบบสัมผัสด้านหลัง (A) Bell Labs จากรายการหนังสือ Chapin Lab พร้อมลูกศรแสดงหน้าสัมผัสด้านหลังไปยังภูมิภาค n และ p (B) Bell Labs ที่วาดจากสิทธิบัตร (C) ภาพถ่ายของเซลล์วิจัยของ Bell Labs, และ (D) โบรชัวร์ Hoffman Electronics แสดงเซลล์แสงอาทิตย์แบบสัมผัสด้านหลังเชิงพาณิชย์ในปี 1959 224

3-21 แนวคิด Retro PV เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุงหลังคา (A) โบรชัวร์ Hoffman Electronics พร้อมข้อกำหนดสำหรับการออกแบบเซลล์งูสวัดในปี 1960 (B) โบรชัวร์เดียวกันพร้อมภาพรูปทรงเรขาคณิตของการเชื่อมต่อโครงข่าย (C) การออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบมุงหลังคาจากการยื่นสิทธิบัตรโดย Peter Iles (D) แผงเซลล์แสงอาทิตย์งูสวัดปัจจุบันจาก Trina Solar, แผงเซลล์แสงอาทิตย์มุงหลังคาปัจจุบันจาก SunPower 226

3-22 PV ย้อนยุค แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ห่อหุ้มด้วยซิลิโคนเทคโนโลยีเซนเซอร์ (ประมาณปี 1970) 226

3-23 แผนภูมิประสิทธิภาพ NREL แสดงความก้าวหน้าของการปรับปรุงเซลล์วิจัยในช่วงปี 1975 ถึงปัจจุบัน 228

3-24 วิวัฒนาการของเทคโนโลยีดซับ PV ที่ซับซ้อนจากเซมิคอนดักเตอร์ธาตุ ผ่านสารประกอบไบนารีและมัลตินารี ไปจนถึงวัสดุอินทรีย์อนินทรีย์ไฮบริดในปัจจุบัน 228

3-25 ส่วนของแผนภูมิประสิทธิภาพ NREL เน้นความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเซลล์เพอรอฟสไกต์แบบแยกเดียว เซลล์เพอรอฟสไกต์/Si ควบคู่ และเซลล์ตีคู่เพอรอฟสไกต์/CIGS 229

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-26 การเปรียบเทียบสนามเด็กเล่นของเทคโนโลยีไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบความหนาสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์และวัสดุที่ใช้สำหรับการออกแบบทั่วไป เทคโนโลยีหลักที่มีจำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน ได้แก่ Si, CdTe, CIGSSe, GaAs, a-SiH และ OPV 229

3-27 แผนภูมิประสิทธิภาพแชมป์เปี้ยนโมล NREL เผยแพร่และอัปเดตบนเว็บไซต์ NREL (NREL, N.D.C) รูปจำแนกโมลที่ผ่านการตรวจสอบตามประเภทเทคโนโลยีและขนาด แผนภูมินี้ได้รับการอัปเดตเป็นระยะ ๆ 230

3-28 หน้าตัดของอุปกรณ์ที่ใช้ GaAs แบบหลายทางในยุคแรก (A) Lattice matched และ (B) การออกแบบที่แปรสภาพหรือตาข่ายไม่ตรงกัน 232

3-29 เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ Perovskite, (A) หน้าตัดแสดงชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์ไฮบริดเพอรอฟสไสต์แบบแยกเดียว (B) การกำหนดค่าทางเคมีของเพอรอฟสไกต์ไฮบริด (ABX3) ด้วยวัสดุที่ใช้ Pb ทั่วไป 232

3-30 (A) ลักษณะการดูดกลืนเปรียบเทียบเพอรอฟสไกต์ไฮบริด AX3 ที่ใช้ Pb กับตัวดูดซับ PV ทั่วไปอื่นๆ (B) โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของไฮบริดเพอรอฟสไกต์ยืนยันลักษณะช่องว่างของวัสดุโดยตรง 233

3-31 โครงสร้างตัวแทนของเซลล์แสงอาทิตย์แบบแทนดัม ที่ใช้วัสดุเพอรอฟสไกต์ (A) การเชื่อมต่อแบบกลระหว่างเซลล์เพอรอฟสไกต์กับเซลล์ซิลิคอน (Si) (B) การเชื่อมต่อแบบกลระหว่างเซลล์เพอรอฟสไกต์กับเซลล์ CIGSSe และ (C) โครงสร้างแบบบูรณาการเสาหิน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่รวมอุปกรณ์หลายชั้นไว้ในระบบเดียว 235

3-32 (A) ส่วนแบ่งไฟฟ้าหมุนเวียนโดยประมาณของกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งทั่วโลก (ตามกิกะวัตต์) จนถึงปี 2019 (B) ส่วนแบ่งไฟฟ้าหมุนเวียนโดยประมาณของการผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งทั่วโลก จนถึงปี 2019 และ (C) ส่วนแบ่งไฟฟ้าหมุนเวียนโดยประมาณของการผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้งทั่วโลก 236

3-33 การไหลของวงจรชีวิต stages พลังงาน วัสดุ และน้ำทิ้งสำหรับระบบ PV 246

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-34 แผนภาพการไหลของกระบวนการรวมของการผลิตระบบ PV Si ผลึกเดี่ยว (sc Si), Si หลายผลึก (mc Si) และแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ตัวย่อ mg Si, โลหะเกรดซิลิคอน, SoG–Si, ซิลิคอนเกรดพลังงานแสงอาทิตย์, Cz, Czochralski, BOS ความสมดุลของระบบ 246

3-35 รายละเอียดความต้องการพลังงานสะสม (เมกะจูลต่อตารางเมตร) ของแต่ละขั้นตอนวงจรชีวิตสำหรับ PV เชิงพาณิชย์ (single Si, multi Si, CdTe, CIGS) และ PV ทางแยกเดี่ยวเพอรอฟสไกต์ที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงต่อตารางเมตร ของระบบ PV 250

3-36 รายละเอียดความต้องการพลังงานสะสม (เมกะจูลต่อกิโลวัตต์พีก) ของแต่ละช่วงวงจรชีวิตสำหรับ PV เชิงพาณิชย์ ซึ่งแสดงต่อ กิโลวัตต์-พีก ของระบบ PV , BOS แบบติดตั้งบนพื้นดินถือว่าเหมือนกันสำหรับ PV ทุกประเภท 251

3-37 การลงทุนด้านพลังงาน (MJPE กิโลวัตต์-ชั่วโมง) สำหรับระบบ single-c Si, multi-c Si, CdTe, CIGS PVs 252

3-38 ศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อน (kg CO_2eq ตารางเมตร) รายละเอียดของแต่ละช่วงวงจรชีวิตสำหรับ PV เชิงพาณิชย์ (single-c, Si, multi-c, Si, CdTe, CIGS) และ PV ทางแยกเดี่ยวที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงต่อตารางเมตร ของระบบ PV การเคลือบสารละลาย MAPbI 3 ระบบเพอรอฟสไกต์แบบแยกเดียวบนพื้นผิวแข็ง 253

3-39 ศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อน (kg CO_2eq กิโลวัตต์-พีก) รายละเอียดของแต่ละช่วงวงจรชีวิตสำหรับระบบ PV แบบ single Si, multi Si, CdTe และ CIGS ซึ่งแสดงต่อกิโลวัตต์-พีก ของระบบ PV 254

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-40 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ตลอดวงจรชีวิตจากซิลิคอนผลึกเดี่ยวเชิงพาณิชย์ (sc-Si และ mc-Si), CdTe, CIGS PV systems โดยสมมติว่าการฉายรังสีสามระดับ สัญลักษณ์ขนาดเล็ก 1000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, สัญลักษณ์ขนาดกลาง 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, และสัญลักษณ์ขนาดใหญ่ 2300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับ BOS แบบเอียงละติจูดที่ติดตั้งบนพื้นดิน 255

3-41 เวลาคืนพลังงาน (ปี) ของระบบซิลิคอนผลึกเดี่ยวและหลายผลึก CdTe และ CIGS PV โดยสมมติว่าระดับการฉายรังสีสามระดับ 1000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, 2300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับ BOS เอียงละติจูดที่ติดตั้งบนพื้นดิน ตามข้อมูลที่ระบุไว้ในตารางที่ 3-2 อัตราส่วนประสิทธิภาพ 0.85 η กริด = 0.30 257

3-42 ผลตอบแทนจากการลงทุนด้านพลังงาน ของระบบซิลิคอนผลึกเดี่ยวและหลายผลึก CdTe และ CIGS PV ภายใต้ระดับการฉายรังสีสามระดับ 1000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, สัญลักษณ์ขนาดกลาง 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, และสัญลักษณ์ขนาดใหญ่ 2300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, อัตราส่วนประสิทธิภาพ 0.85 อายุการใช้งาน 30 ปี 259

3-43 ผลตอบแทนจากการลงทุนด้านพลังงาน (ในแง่ของพลังงานปฐมภูมิ) ของระบบซิลิคอนผลึกเดี่ยวและหลายผลึก CdTe และ CIGS PV ภายใต้ระดับการฉายรังสีสามระดับ 1000 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, สัญลักษณ์ขนาดกลาง 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี, และสัญลักษณ์ขนาดใหญ่ 2300 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพ 0.85 อายุการใช้งาน 30 ปี η grid = 0.30 259

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-44 การปล่อย SO_2 และ NO_x ในวงจรชีวิตจากโมดูลซิลิคอนและ CdTe PV โดยที่ BOS คือความสมดุลของระบบ (BOS) นั่นคือ การรองรับโมดูล การเดินสาย และการปรับสภาพพลังงาน การประมาณการขึ้นอยู่กับการติดตั้งบนหลังคาแสงแดดของยุโรปใต้ 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี และอายุการใช้งาน 30 ปี 260

3-45 การปล่อย Cd ในบรรยากาศตลอดวงจรชีวิตสำหรับระบบ PV จากการใช้ไฟฟ้าและเชื้อเพลิง ซึ่งปรับให้เป็นมาตรฐานสำหรับแสงแดดเฉลี่ยของยุโรปใต้ที่ 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพ 0.8 และอายุการใช้งาน 30 ปี 263

3-46 การปล่อยโลหะหนักเนื่องจากการใช้ไฟฟ้า การปล่อยมลพิษเป็นมาตรฐานสำหรับแสงแดดเฉลี่ยของยุโรปใต้ที่ 1700 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อปี อัตราส่วนประสิทธิภาพ 0.8 และอายุการใช้งาน 30 ปี 264

3-47 การจำลองขึ้นอยู่กับข้อมูลลม แสงอาทิตย์ และโหลดรายชั่วโมงจริงในรัฐนิวยอร์ก วันที่โหลดสูงสุดของปีปรากฏขึ้น (สีเขียว) โหลดรายชั่วโมงจริงในรัฐนิวยอร์ก (สีแดง) ผลผลิตรายชั่วโมงของ 40 กิกะวัตต์ PV เอียงไปทางทิศใต้กระจายไปทั่วรัฐ (สีน้ำเงิน) ผลผลิตจากกังหันลม 30 กิกะวัตต์ ที่ติดตั้งในพื้นที่ที่มีทรัพยากรลมสูงภายในรัฐนิวยอร์ก (สีม่วง) รวมพลังงานแสงอาทิตย์และลม 269

3-48 การลดจุดสูงสุดในพื้นที่ควบคุมของรัฐนิวยอร์กหลังจากปรับใช้พลังงานที่ผลิตโดย PV 4 กิกะวัตต์ PV ถูกวางไว้ใน 11 ภูมิภาคทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างกันทั่วทั้งรัฐ สีเขียว แผงหันไปทางทิศใต้ที่เอียงละติจูด (สีแดง) แผงเอียงที่ 501 ไปทางทิศใต้ที่มุมราบ 701 ไปทางทิศตะวันตก กล่าวคือ มุมที่เหมาะสมที่สุดทำให้ยอดสูงสุดลดลงในช่วงฤร้อน 270

3-49 โหลดรายชั่วโมงในรัฐนิวยอร์กสำหรับวันที่พีกประจำปีและวันที่โหลดขั้นต่ำ ความยืดหยุ่นของกริดนิวยอร์กอยู่ที่ประมาณ 70% 271

3-50 โหลดสุทธิสำหรับระบบลมพลังงานแสงอาทิตย์แบบจำลองในนิวยอร์กซึ่งแสดงพลังงานส่วนเกินเหนือระดับความยืดหยุ่นของกริด 272

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-51 การเปรียบเทียบระบบจัดเก็บข้อมูลในแง่ของเวลาคายประจุและกำลังไฟที่กำหนด SMES คาดว่าจะมีคุณสมบัติการคายประจุและพลังงานเทียบเท่ากับ EDLC Electricity Storage Association Technologies 274

3-52 ประเภทแบตเตอรี่ การเปรียบเทียบความหนาแน่นพลังงาน 279

3-53 กลไกการทำงานพื้นฐานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 280

3-54 LIB ห้าประเภทที่ใช้ใน EV พร้อมแผนภูมิเรดาร์ที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพเปรียบเทียบในแง่ของเกณฑ์หลักหลายประการ 281

3-55 ศักยภาพในการลดต้นทุนตามแหล่งที่มาสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ LFP ทั่วไป 2016–30 การจัดเก็บไฟฟ้าและพลังงานหมุนเวียน ต้นทุนและตลาดจนถึงปี 2030 281

3-56 แผนผังแนวคิดของโรงงาน PHS 285

3-57 แผนผังของโรงไฟฟ้า CAES ทั่วไป หน้าเว็บห้องปฏิบัติการแห่งชาติซานเดีย 288

3-58 แผนผังของระบบบีบอัดและขยาย McIntosh, Alabama, CAES Integrating Renewables (n.d.), CAES 288

3-59 ส่วนแบ่งการตลาดของเทคโนโลยีโฟโตโวลเทอิกประเภทต่างๆ ข้อมูล ปี 2000-2009 จาก Navigant, ตั้งแต่ปี 2010 เป็นต้นไปจาก IHS Markit กราฟ PSE Projects GmbH 2021 291

3-60 การสูญเสียเชิงสเปกตรัมในเซลล์แสงอาทิตย์ รูปแสดงพลังงานสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนสามารถผลิตได้เมื่อเทียบกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ (AM 1.5) 295

3-61 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Al-BSF 297

3-62 พื้นผิวบนด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (ซ้าย) และผลึกรวม (ขวา) 298

3-63 แบบจำลองการขนส่งกระแสไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสเงินแบบพิมพ์สกรีนมีการเสนอเส้นทางการขนส่งกระแสไฟฟ้าสามแบบระหว่างผลึกเงินและมวลรวมของเงิน 300

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-64 ภาพ SEM ของหน้าตัดบริเวณหน้าสัมผัสอะลูมิเนียมด้านหลังและพื้นที่ที่ถูกโด๊ปด้านล่าง (Al-BSF) 301

3-65 สามขั้นตอนการพิมพ์สำหรับการสร้างหน้าสัมผัสในโครงสร้างบัสบาร์คู่ 301

3-66 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERC 303

3-67 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL 303

3-68 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของหน้าตัดในแต่ละกรณีของหน้าสัมผัส Al-BSF แบบเฉพาะจุด โดยใช้แนวทาง i-PERC (A) บริเวณที่ถูกเลเซอร์กัดถูกเติมด้วยเนื้อพาสต์และมี BSF ที่ลึก (B) บริเวณที่ถูกเลเซอร์กัดมีช่องว่างและมี BSF ที่ลึก (C) บริเวณที่ถูกเลเซอร์กัดมีช่องว่าง และไม่พบการก่อตัวของ BSF 304

3-69 กระบวนการไหลเชิงสเกมาติกสำหรับสายการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนผลึกแบบ PERC อุตสาหกรรม พร้อมรูปแสดงกระบวนการผลิตและเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งได้อธิบายในข้อความ 306

3-70 ซ้ายภาพของด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์ mono-facial แบบพิมพ์สกรีน PERC ขวา แบบจำลองของโครงสร้างอุปกรณ์ของเซลล์ดังกล่าว 306

3-71 แผนผังแสดงเทคนิค PECVD หลักสองรูปแบบ ได้แก่ พลาสมาแบบความถี่ต่ำโดยตรง (ซ้าย) และเสาอากาศไมโครเวฟ (ขวา) 310

3-72 แบบจำลองอย่างง่ายของกระบวนการเกิดจุดสัมผัส (contact formation) (A) แผนภาพตัดขวางของแปะหนาเงิน (Ag thick film paste) บนซิลิคอน (100) หลังจากการเผาสารอินทรีย์ (B) ชั้นแก้วกัดกร่อนผ่านชั้น SiNx (C) ปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างซิลิคอน SI และแก้ว ทำให้เกิดตะกั่ว (Pb) (D) ตะกั่วเหลวเริ่มละลายเงิน (Ag) (E) ส่วนผสม Ag-Pb ที่หลอมละลายทำปฏิกิริยากับซิลิคอน ทำให้เกิดปิรามิดกลับหัว (F) เมื่อเย็นตัวลง เงินตกผลึกใหม่บนระนาบ (111) ของซิลิคอน 310

3-73 ภาพด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ Bifacial PERC ที่มีบัสบาร์ 5 เส้น พร้อมแผนผังแสดงโครงสร้างของเซลล์ดังกล่าว 311

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-74 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนที่มีการพาสสิเวตพื้นผิว (สีน้ำเงิน) ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดยมีเพียงจุดโลหะขนาดเล็ก (สีเหลือง) ที่ทำหน้าที่เป็นจุดสัมผัสฐาน 312

3-75 ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (IQE) ของโครงสร้างพื้นผิวด้านหลังที่แตกต่างกันบนซิลิคอน FZ-Si ที่มีความหนา 250 ไมโครเมตร และความต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร โดยมีโครงสร้างด้านหน้าที่มีประสิทธิภาพสูง 313

3-76 ภาพสเก็ตช์แสดงผลกระทบของสองกลไกพาสสิเวต คือ การลดความหนาแน่นของสถานะรอยต่อ (Dit) (เส้นประ) และการพาสสิเวตแบบสนามไฟฟ้า (เส้นประ) 314

3-77 เส้นโค้งการเรียนรู้ของกระบวนการพิมพ์สกรีนแบบแท่นเรียบ (flatbed Screen Printing) ในช่วงปี 2005–2017 โดยพิจารณาจากความกว้างของเส้นนำไฟฟ้า W_f 317

3-78 เส้นนำไฟฟ้าที่พิมพ์สกรีนตามเทคโนโลยีล่าสุด 317

3-79 หลักการทำงานของกระบวนการชุบเงินแบบกระตุ้นด้วยแสง (Light Induced Plating) เซลล์แสงอาทิตย์ถูกเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่ด้านหลัง เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะเกิดศักย์ไฟฟ้าลบที่ขั้วหน้าสัมผัส ซึ่งจะดึงดูดไอออนโลหะที่มีประจุบวกเข้ามา 319

3-80 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของเส้นนำไฟฟ้า Ni/Cu/Ag ที่ผ่านกระบวนการชุบไฟฟ้าบนพื้นผิว TOPCon ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้า 320

3-81 ภาพ TEM ของการตัดขวางผ่านโครงสร้าง TOPCon ควรสังเกตว่า ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นออกไซด์เริ่มต้นและอุณหภูมิของกระบวนการ กลไกการอุโมงค์ (tunneling mechanism) หรือ รูจุลภาค (microholes) เป็นตัวการหลักที่รับผิดชอบในการขนส่งกระแส 324

3-82 ส่วนแบ่งของธาตุที่ใช้ในการโด๊ปสำหรับแผ่นเวเฟอร์ p type แบบโมโนคริสตัลไลน์ 327

3-83 พื้นที่การดักจับของสิ่งเจือปนต่างๆ ในซิลิคอนผลึกเดี่ยวเป็นฟังก์ชันของระดับพลังงาน 328

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-84 โครงสร้างด้านหน้าของเซลล์ HIT 330

3-85 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ Heterojunction แบบอุตสาหกรรมที่มีจังชันด้านหลังเมื่อไม่นานมานี้ บริษัทหลายแห่งได้เริ่มผลิตเซลล์เฮเทอโรจังก์ชันในระดับอุตสาหกรรม 331

3-86 โครงสร้างของเซลล์ i TOPCon 331

3-87 เซลล์จุดสัมผัสของ SunPower 332

3-88 เซลล์แสงอาทิตย์แบบจุดเชื่อมต่อด้านหลัง และผลกระทบจากเงาไฟฟ้า) ผู้ให้พาหะส่วนน้อยที่ถูกสร้างขึ้นในบริเวณสีเทาเหนือ n-BSF ต้องเคลื่อนที่ในแนวข้างไปยังตัวเก็บประจุ p-emitter เนื่องจากระยะทางในบริเวณนี้ยาวกว่าความหนาของเซลล์มาก ประสิทธิภาพการเก็บพาหะจึงลดลงอย่างมาก (แผนที่กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากลำแสงทางด้านขวา) 334

3-89 เซลล์แสงอาทิตย์แบบจุดเชื่อมต่อด้านหลังแบบอินเตอร์ดิจิเทต ที่มีโครงสร้างของตัวปล่อยประจุ, ชั้น BSF และโครงข่ายไฟฟ้า แยกออกจากกัน โดยใช้ฟิล์มชนิดป้องกันการสูญเสียพาหะและเป็นฉนวนไฟฟ้า 334

3-90 โครงสร้างของ เซลล์แสงอาทิตย์แบบหน้าสัมผัสด้านหลังชนิดเฮเทอโรจังก์ชันแบบอินเตอร์ดิจิเทต 336

3-91 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า (ด้านบน) และระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระหรือไม่เชื่อมต่อโครงข่าย (ด้านล่าง)” 338

3-92 ลักษณะสมบัติ I–V ของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนผลึกขนาด 156 × 156 ตารางมิลลิเมตร ที่วัดภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน พารามิเตอร์สมรรถนะประกอบด้วย I_{sc} = 9.707 A, V_{oc} = 0.744 V และ η = 21.87% ค่า Fill Factor เป็นตัวชี้วัดความเป็นรูปสี่เหลี่ยมของลักษณะสมบัติ I–V โดยนิยามได้ว่า FF = $V_{mpp}I_{mpp}$ / $V_{oc}I_{sc}$และมีค่า FF = 0.737 กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ 73-7% ของพื้นที่จาก (0,0) ถึง (V_{oc}, I_{sc}) ถูกเติมเต็ม 342

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-93 ลักษณะสมบัติ I–V ของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 156 × 156 ตารางมิลลิเมตร ที่วัดภายใต้ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์หลายระดับ ได้แก่ 2.69, 18.7, 54.7, 169, 354 และ 998 วัตต์ต่อตารางเมตร 343

3-94 พารามิเตอร์สมรรถนะเป็นฟังก์ชันของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งได้มาจากข้อมูลใน 2 โดยเส้นประแสดงความสัมพันธ์เชิงลอการิทึมแบบเดี่ยวของแรงดันวงจรเปิด 344

3-95 ประสิทธิภาพที่วัดได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si และ mc-Si ในฐานะฟังก์ชันของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สำหรับ c-Si การประมาณค่าแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 16.64% ที่ความเข้มรังสี 0.45 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ในขณะที่ประสิทธิภาพที่วัดได้ที่ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร(STC) เท่ากับ 15.47% สำหรับ mc-Si การประมาณค่าแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 15.32% ที่ความเข้มรังสี 0.525 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร ในขณะที่ประสิทธิภาพที่วัดได้ที่ 1 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร (STC) เท่ากับ 14.80% 344

3-96 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ c-Si ในฐานะฟังก์ชันของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ สำหรับสามวิธีที่ใช้ ได้แก่ วิธีสมมติให้ประสิทธิภาพคงที่, วิธีการประมาณค่าแบบสามพารามิเตอร์ และวิธี STC (STC method) 347

3-97 แผนผังโครงร่างของโมลโฟโตโวลตาอิก (PV module) ที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 72 เซลล์ จัดเรียงในรูปแบบ 6 × 12 โปรดสังเกตว่ามี พื้นที่ระหว่างเซลล์ (intercell area) และ พื้นที่บริเวณขอบ (edge area) ซึ่งแม้จะมีขนาดเล็ก แต่ก็มีความสำคัญต่อการออกแบบโมล7 ตัวอย่างของโมลโฟโตโวลตาอิก (PV modules) ที่มีจำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน 348

3-98 ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ในฐานะฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงในหน่วยต่อหน่วย (p.u.) ได้แก่ (A) Solar Konzept ขนาด 2 กิโลวัตต์ (B) Sunways ขนาด 3-6 กิโลวัตต์ (C) SMA ขนาด 5 กิโลวัตต์ (D) SMA ขนาด 11 กิโลวัตต์ (E) Satcon ขนาด 50 กิโลวัตต์ (F) Satcon ขนาด 100 กิโลวัตต์ (G) Siemens ขนาด 1000 กิโลโวลต์แอมแปร์ 352

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-99 ประสิทธิภาพแบบยุโรป (European efficiency) ของอินเวอร์เตอร์พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ ในฐานะฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า 353

3-100 ตัวอย่างผลกระทบของ การจำกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ โดยความแปรปรวนของกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ที่สูงกว่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุด จะหายไปเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากการจำกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ ในตัวอย่างนี้ การสูญเสียการผลิตไฟฟ้ามีเพียงประมาณ 10% สำหรับอัตราส่วนการออกแบบอินเวอร์เตอร์ ขนาดเล็กกว่า (PAC/PDC) เท่ากับ 75% ซึ่งอธิบายไว้ใน 354

3-101 แผนภาพแบบโพลาร์ แสดงการเปลี่ยนแปลงของ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ในแถวบน และผลผลิตพลังงานในแถวล่าง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลง ทิศทางการวางโมล และมุมเอียงของโมล ณ 4 ตำแหน่งที่ตั้งที่แตกต่างกันรัศมีของกราฟแสดงค่า มุมเอียงของโมล (0–90°) ขณะที่ ทิศทางการวางโมล แสดงอยู่ที่แกนด้านนอกของกราฟเครื่องหมาย กากบาทสีดำ แสดงตำแหน่งของ มุมเอียงและทิศทางการติดตั้ง ที่ให้ ค่าความเข้มรังสีและผลผลิตพลังงานสูงสุด 360

3-102 สวนพลังงานแสงอาทิตย์ Benban Solar Park ภาพถ่ายจากดาวเทียมเมื่อวันที่ 4 เมษายน ค.ศ. 2021 โดยพื้นที่ที่ปรากฏในภาพมีขนาดประมาณ 7 × 7 กิโลเมตร 363

3-103 ภาพโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ Núñez de Balboa โดยภาพด้านซ้ายแสดงช่วงระหว่างการก่อสร้าง และภาพด้านขวาเป็นภาพถ่ายจากดาวเทียมของโรงไฟฟ้าเมื่อเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2020 (ซ้าย) ที่มา Iberdrola, (ขวา) 364

3-104 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดทั้งวันจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) (สีเขียวเข้ม) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (สีแดงเข้ม) ระบบแบตเตอรี่ (สีดำ) และค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (สีเขียวอ่อน/สีเหลือง) ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะการทำงานของระบบพลังงานแบบไฮบริด 366

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-105 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในช่วงเหตุการณ์ที่มีเมฆบังชั่วคราวของ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ของเหมือง DeGrussa (สีเขียวเข้ม) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (สีแดงเข้ม) ระบบแบตเตอรี่ (สีดำ) และ ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (สีเขียวอ่อน/สีเหลือง) ซึ่งแสดงให้เห็นการทำงานของ ระบบพลังงานแบบไฮบริด 366

3-106 (ซ้าย) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกาะ Mandhoo และ (ขวา) เส้นโค้งความต้องการใช้ไฟฟ้ารายวันและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบ PV ซึ่งใช้ในการออกแบบระบบ 367

3-107 เส้นเวลาโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ลอยน้ำ ตั้งแต่ปี 2007 ถึง 2014 372

3-108 ภาพของระบบขนาด 150 เมกะวัตต์ แรกในประเทศจีนที่ติดตั้งในปี 2018 โดยบริษัท Three Gorges New Energy Corporation การลงทุนทั้งหมดอยู่ที่ 151 ล้านดอลลาร์ 375

3-109 การติดตั้ง FPV ประจำปีและสะสม (กิกะวัตต์-พีก) ตั้งแต่ปี 2010 ถึง 2027 376

3-110 การกระจายของโรงไฟฟ้า FPV ตามขนาดและประเทศ ณ เดือนธันวาคม 2018 377

3-111 การติดตั้ง FPV ที่ Walden, Colorado 380

3-112 โครงร่างทั่วไปของระบบ FPV 381

3-113 โครงสร้างลอยน้ำสองประเภท (A) แพ (B) พอนทูน Oceans of Energy 381

3-114 อัตราส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio) ของระบบ FPV ในพื้นที่ทดสอบ อัตราส่วนประสิทธิภาพทั่วไปสำหรับระบบติดตั้งบนหลังคาในสิงคโปร์จะแสดงโดยเส้นประสีน้ำเงิน 388

3-115 ข้อมูลผลผลิตประจำเดือนเป็นระยะเวลา 3 ปีสำหรับระบบ FPV ขนาด 100 กิโลวัตต์-พีก ที่อ่างเก็บน้ำเขื่อนฮับชอน ข้อมูลจาก Suh J, Jang Y และ Choi Y
(2020) การเปรียบเทียบการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สังเกตและประมาณการจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ลอยน้ำ กรณีศึกษาที่เขื่อนฮับชอน, เกาหลี 389

3-116 ระบบลอยน้ำ, ระบบติดตาม, ระบบทำความเย็น, ระบบรวมแสง (A) โคลิกโนลาปิซา, อิตาลี, (B) ช็องจูซี, เกาหลี 391

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-117 การแยกคลื่น คลื่นในกล่องล่างประกอบด้วยคลื่นที่แสดงในแปดกล่องด้านบน 395

3-118 การโต้ตอบของคลื่นกับแพ (A) มิติของแพ (B) แพที่ระดับน้ำทะเล (C) แรงบิด τ ที่สัมผัสกับแพและพยายามหมุนมันไปรอบๆ แกนที่แสดง (D) แพหมุนไปที่ θ, (E) พิกัดและมิติของแพ 398

3-119 เวกเตอร์แรงและรัศมีในตำแหน่งต่างๆ เมื่อสันคลื่นสัมผัสแพเป็นครั้งแรก ที่ (A) ด้านซ้าย (B) ตรงกลาง และ (C) ด้านขวาของแพ 399

3-120 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงของแพสำหรับทุกวันในเดือน สิงหาคม 2016 400

3-121 อุณหภูมิสมดุลและอุณหภูมิแวดล้อมของทั้งระบบ FPV และ LBPV รวมถึงอุณหภูมิผิวทะเล ตลอดทั้งปี 2016 402

3-122 ผลผลิตพลังงานที่ปรับให้เป็นมาตรฐานในหน่วย กิโลวัตต์-ชั่วโมง ต่อ กิโลวัตต์-พีก สำหรับระบบ FPV นอกชายฝั่งและระบบ LBPV (แกนขวา) และความแตกต่างของกำลังผลิตเชิงสัมพัทธ์ (แกนซ้าย) 403

3-123 กราฟกระจายของค่าอัลบีโดและสัดส่วนของฟองคลื่นสีขาวเป็นฟังก์ชันของความเร็วลมตลอดปี 2016 สำหรับค่าความเร็วลมที่เป็นเกณฑ์ (เส้นประ) 408

3-124 ความแตกต่างของพลังงานที่ผลิตได้โดยเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ ระหว่างระบบที่ใช้ค่าอัลบีโดแบบจำลองและค่าอัลบีโดคงที่สำหรับตำแหน่งของระบบ 409

4-1 หอคอยแห่งลม ตั้งอยู่ที่กรุงเอเธนส์ (แสดงภาพของโบรีอัสและสกิโรน) 476

4-2 แสตมป์ของกรีซที่แสดงเรือใบอาร์โก 477

4-3 ลักษณะของกังหันลมในยุคกลางที่ใช้สำหรับบดข้าว และกังหันลมแบบอเมริกันที่ใช้สำหรับปั๊มน้ำ 477

4-4 การพัฒนาขนาดของกังหันลมสมัยใหม่ตามเวลา 478

4-5 การพัฒนาเวลาของความสามารถในการผลิตพลังงานลมทั่วโลกและในยุโรปในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา 478

4-6 การพัฒนาเวลาของการผลิตพลังงานลมในระดับโลก ยุโรป สหรัฐอเมริกา และจีน 479

4-7 การพัฒนาพลังงานลมตามภูมิภาคตามสถานการณ์ 479