

ไฮโดรเจนสีเขียว (Green Hydrogen)

การวิเคราะห์สารสนเทศ : ไฮโดรเจนสีเขียว (Green Hydrogen)

โดย นางนงศ์ลักษณ์ เทียงธรรม นักเอกสารสนเทศชำนาญการ สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

: ผู้เขียนและเรียบเรียง

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

: ที่ปรึกษาและตรวจทานเนื้อหา

เมื่อเดือนตุลาคม ปี ค.ศ. 2018 คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของสหประชาชาติ (The Intergovernmental Panel on Climate Change of the United Nations - IPCC) ได้ตั้งเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนที่จะจำกัดการขึ้นของอุณหภูมิโลกไม่เกิน 1.5 องศาเซลเซียสภายในปี ค.ศ. 2100 ทำให้พลังงานใหม่ที่เป็นพลังงานสะอาดเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานโดยลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและสร้างระบบพลังงานคาร์บอนต่ำสีเขียว พลังงานใหม่เป็นพลังงานหมุนเวียน ไม่ปล่อยคาร์บอนและไม่ใช้ฟอสซิล ถูกพัฒนาต่อและใช้ประโยชน์ด้วยเทคโนโลยีใหม่เพื่อแทนที่พลังงานดั้งเดิม พลังงานหลักในพลังงานใหม่ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานนิวเคลียร์ และพลังงานไฮโดรเจน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2019 ต้นทุนเฉลี่ยของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานใหม่ต่ำกว่าการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติ แต่ยังสูงกว่าการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน 16% โดยมีการคาดการณ์ว่าหลังจากปี ค.ศ. 2030 ต้นทุนพลังงานใหม่จะต่ำกว่าต้นทุนของเชื้อเพลิงฟอสซิล และสัดส่วนการใช้พลังงานใหม่จะเพิ่มขึ้น โดยในปี ค.ศ. 2050 การใช้พลังงานใหม่จะมีสัดส่วนร้อยละ 60 ของการใช้พลังงานหลักทั้งหมดของโลก (Zou et al., 2021) และเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2023 สหภาพยุโรปเริ่มใช้พระราชบัญญัติที่เกี่ยวกับพลังงานหมุนเวียนที่กำหนดเงื่อนไขของการที่ไฮโดรเจน แอมโมเนีย และพลังงานอื่นจะถูกนับเป็นพลังงานหมุนเวียน (Keating, 2023)

ไฮโดรเจนเป็นพลังงานใหม่ที่สามารถสำรองได้ ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดในโลก เป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีปริมาณพลังงานสูง เป็นองค์ประกอบของน้ำ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ รหัสสีที่ใช้กับไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2017; KBR, n.d.) กระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่สำคัญมี 3 กระบวนการ ได้แก่ 1. ไฮโดรเจนสีเทาผลิตจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (SMR - Steam Methane Reforming Process) 2. ไฮโดรเจนสีน้ำเงินผลิตจากกระบวนการเปลี่ยนรูปก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (SMR - Steam Methane Reforming Process) และมีการดักจับคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ด้วยอัตราการดักจับร้อยละ 90 และ 3. ไฮโดรเจนสีเขียวผลิตจากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า หรือกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) (Zeyen et al., 2023)

โดยส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจนสีเทาซึ่งผลิตจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ก๊าซธรรมชาติ หรือถ่านหิน ในกระบวนการผลิต จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ชั้นบรรยากาศจำนวนมาก และยังมีไฮโดรเจนสีอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนสีแดงเป็นไฮโดรเจนที่ผลิตจากชีวมวล เป็นต้น การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสน้ำซึ่งใช้ไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียนจะปล่อยมลพิษต่ำหรือเป็นศูนย์ (วิชาญ นาคทอง, ม.ป.ป.) ปัจจุบันไฮโดรเจนผลิตจากเชื้อเพลิง ฟอสซิลทำให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 900 ล้านตันในปี ค.ศ. 2020 คิดเป็นร้อยละ 2.5 ของ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลกจากภาคพลังงานและอุตสาหกรรม (International Energy Agency, 2023a)

กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) สามารถผลิตไฮโดรเจนบริสุทธิ์พิเศษ (Ultra – Pure Hydrogen 99.999%) (โลกสีฟ้า (นามแฝง), 2565) เป็นที่ยอมรับกันว่าไฮโดรเจนสีเขียวมีบทบาทสำคัญในการลด การปล่อยคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในปัจจุบันยังมีต้นทุนสูงในการผลิต คาดว่าในปี ค.ศ. 2050 ไฮโดรเจนจะมี บทบาทมากขึ้นในการแทนที่เชื้อเพลิงฟอสซิลในอุตสาหกรรมที่ยากที่จะบรรลุการปล่อยคาร์บอนเป็นศูนย์โดยการ เปลี่ยนเป็นไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงอุตสาหกรรมเหล็กกล้า การกลั่นน้ำมัน การสังเคราะห์แอมโมเนียและไฮโดรเจนเพื่อใช้ ในอุตสาหกรรม การขนส่งระยะไกล รวมทั้งรถบรรทุกและเรือ (Zou et al., 2021) จากข้อมูลการจดสิทธิบัตร แสดงถึง การผลิตไฮโดรเจนมีการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพื้นฐานไปสู่วิธีที่ปล่อยก๊าซ เรือนกระจกต่ำซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้หน่วยผลิตอิเล็กโทรไลเซอร์เติบโตอย่างรวดเร็ว บริษัทขนาดใหญ่ที่จดสิทธิบัตร ไฮโดรเจนใหม่อยู่ในภาคยานยนต์และภาคเคมีที่มุ่งเน้นเทคโนโลยีอิเล็กโทรลิซิสและเซลล์เชื้อเพลิง และการใช้ ไฮโดรเจนในภาคยานยนต์มีอัตราการเติบโตสูงกว่าการนำไปใช้ประโยชน์ปลายทางในภาคอื่น ๆ (International Energy Agency, 2023a) ทั้งนี้ การนำมาไฮโดรเจนสีเขียวมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงสามารถใช้งานได้หลายเรื่อง รวมทั้งการเป็นพลังงานในอาคาร ภาคขนส่ง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พกพา และระบบไฟฟ้าสำรอง (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2017) สำหรับการใช้ไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงของยานยนต์ไฟฟ้า นั้น ให้ประสิทธิภาพมากกว่ายานยนต์ที่ใช้ น้ำมัน ขับได้ระยะทางไกล และไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นคำตอบ ของการขนส่งที่ยั่งยืน มีอายุการใช้งานนานกว่าและน้ำหนักเบากว่าแบตเตอรี่ (Bhagavathy & Thakur, 2021)

สาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดในโลก คิดเป็นร้อยละ 29.8 ของ การปล่อยก๊าซทั้งหมดของโลก มากกว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสหรัฐอเมริกา สาธารณรัฐอินเดีย และสหพันธรัฐรัสเซียรวมกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเดือนพฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2020 ในที่ประชุมสมัชชาใหญ่แห่ง สหประชาชาติ สาธารณรัฐประชาชนจีนได้ให้คำมั่นสัญญาที่จะให้จุดที่สูงที่สุดของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ภายในปี ค.ศ. 2030 และมุ่งมั่นที่จะบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี ค.ศ. 2060 สำหรับไฮโดรเจนนั้น สาธารณรัฐประชาชนจีนมีการส่งเสริมกลยุทธ์ “Hydrogen China” และจากการคาดการณ์ของ China

Hydrogen Energy Alliance สาธารณรัฐประชาชนจีนจะมีความต้องการไฮโดรเจนรายปีเฉลี่ยถึง 60 ล้านตันในปี ค.ศ. 2050 โดยร้อยละ 70 เป็นไฮโดรเจนสีเขียว (Zou, 2021)

สาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้ผลิตไฮโดรเจนรายใหญ่ที่สุดของโลก จำนวน 33 ล้านตันต่อปี คิดเป็นหนึ่งในสามของการผลิตไฮโดรเจนทั้งหมดของโลก The International Energy Association Global Hydrogen Review 2021 ได้นำเสนอสัดส่วนของแหล่งพลังงานที่ใช้ผลิตไฮโดรเจนของโลก ดังนี้ ร้อยละ 60 ผลิตจากก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 19 ผลิตจากถ่านหิน ร้อยละ 21 เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาข้อมูลสัดส่วนของแหล่งพลังงานที่ใช้ผลิตไฮโดรเจนของสาธารณรัฐประชาชนจีนจาก China Coal Processing & Utilization Association เป็นดังนี้ ร้อยละ 62 ของไฮโดรเจนผลิตจากถ่านหิน ร้อยละ 19 ผลิตจากก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 8 เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม และร้อยละ 1 ผลิตจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Niu, 2022) พบว่า กระบวนการผลิตไฮโดรเจนของโลกยังปล่อยคาร์บอนสู่บรรยากาศสูง ในขณะที่สาธารณรัฐประชาชนจีนได้เริ่มใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสในการผลิตไฮโดรเจนแล้ว คาดว่าในอนาคตการเปลี่ยนแปลงด้านพลังงานเป็นพลังงานสะอาดจะทำให้สัดส่วนของแหล่งผลิตไฮโดรเจนเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับสหรัฐอเมริกา นั้น มีข้อสัญญาที่จะพัฒนาการใช้ไฮโดรเจนสีเขียวในประเทศและมีเป้าหมายที่จะก้าวไปสู่เศรษฐกิจไฮโดรเจน โดยรัฐบาลจัดงบประมาณ 8,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐให้แก่ศูนย์ด้านพลังงานไฮโดรเจน และกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกาจะลงทุน 100 ล้านดอลลาร์สหรัฐในการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับไฮโดรเจน และเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากคาดว่าสหรัฐอเมริกาจะมีการใช้ไฮโดรเจนเป็นวัตถุดิบสูงขึ้นในปี ค.ศ. 2030 เป็นจำนวน 14 ล้านตัน จึงจำเป็นต้องแทนที่ไฮโดรเจนแบบดั้งเดิมด้วยไฮโดรเจนสีเขียวซึ่งจะทำให้ลดการปล่อยคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่สหภาพยุโรปมีแผนจะลงทุน 430,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐในไฮโดรเจนสีเขียวภายในปี ค.ศ. 2030 (Moore, 2022)

สำหรับสหภาพยุโรปมีแผนจะลงทุน 430,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐในไฮโดรเจนสีเขียวภายในปี ค.ศ. 2030 (Moore, 2022) สหภาพยุโรปมีการนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากสหพันธรัฐรัสเซียในปี ค.ศ. 2021 สูงถึง 155,000 ลูกบาศก์เมตร สงครามระหว่างสหพันธรัฐรัสเซียและยูเครน จึงทำให้เกิดประเด็นปัญหาเรื่องความมั่นคงทางพลังงาน คณะกรรมาธิการยุโรปจึงเสนอโครงสร้างแผนบริหารจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน (REPowerEU) ซึ่งเป็นแผนที่ต้องการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลจากสหพันธรัฐรัสเซียภายในปี ค.ศ. 2530 และมีเป้าหมายที่จะประหยัดพลังงาน ผลิตพลังงานสะอาด และกระจายแหล่งพลังงาน เพื่อทำให้มั่นใจว่าประชาชนยุโรปสามารถเข้าถึงพลังงานที่มีราคาไม่แพง (European Commission, n.d.) โดยเพิ่มปริมาณการผลิตและนำเข้าพลังงานหมุนเวียน (สำนักงานที่ปรึกษาด้านอุตสาหกรรมในต่างประเทศ ประจำกรุงเวียนนา, 2565) ทั้งนี้ มีเป้าหมายสำหรับการผลิต

ไฮโดรเจนจากพลังงานหมุนเวียน จำนวน 10 ล้านตันและนำเข้า จำนวน 10 ล้านตัน ภายในปี ค.ศ. 2030 เพื่อ แทนที่เชื้อเพลิงฟอสซิลในอุตสาหกรรมที่ยากต่อการลดคาร์บอน และได้สนับสนุนทางการเงินเพื่อการวิจัยเกี่ยวกับ ไฮโดรเจน จำนวน 200 ล้านปอนด์ (European Commission, 2022)

สำหรับสาธารณรัฐอินเดียให้ความสำคัญกับไฮโดรเจนสีเขียวเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ที่จะทำให้ประเทศ เปลี่ยนผ่านพลังงานเป็นพลังงานหมุนเวียนเพื่อบรรลุการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2070 และ ตั้งพันธกิจที่จะผลิตไฮโดรเจนสีเขียวด้วยกำลังการผลิตอย่างน้อย 5 ล้านตันภายในปี ค.ศ. 2030 (National Portal of India, n.d.)

สำหรับสหพันธรัฐรัสเซีย การผลิตไฮโดรเจนสีเขียวยังน้อยเนื่องจากต้นทุนการผลิตยังสูงอยู่ แต่ก็มี ความจำเป็นที่จะต้องผลิตเพื่อส่งออก โดยมีแผนจะส่งออกไฮโดรเจน จำนวน 2 ล้านตันในปี ค.ศ. 2035 และ 30 ล้านตัน ภายในปี ค.ศ. 2050 (Vechkinzova et al., 2022)

ประเด็นปัญหาของการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวรวมถึงการมีต้นทุนการผลิตสูง คือ มากกว่า 2 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ กิโลกรัม จากรายงานของ Energy Transitions Commission ต้นทุนของไฮโดรเจนสีเทาอยู่ระหว่าง 0.70 - 2.20 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม และต้นทุนของไฮโดรเจนสีเขียวอยู่ระหว่าง 3.00 – 5.00 ดอลลาร์ต่อกิโลกรัม (Niu, 2022) ราคาไฟฟ้ามีผลต่อต้นทุนของไฮโดรเจนสีเขียวเนื่องจากราคาไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 60 – 70 ของต้นทุน การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสน้ำ (Zou et al., 2021) ดังนั้นการลดต้นทุนไฟฟ้าจากพลังงาน หมุนเวียนจึงมีความสำคัญ การไม่สามารถใช้ประโยชน์พลังงานหมุนเวียนได้ตลอดเวลาจึงเป็นอีกประเด็นปัญหา ของการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว นอกจากนี้ ถึงแม้หลายประเทศจะยังมีพลังงานหมุนเวียนไม่เพียงพอ แต่ยังมี ประเด็นปัญหามาตรการกีดกันทางการค้าในหลายประเทศ และการแข่งขันในตลาดที่ให้เงินอุดหนุนอย่างหนักมาก (Singh, 2023) เทคโนโลยีก็เป็นอีกประเด็นปัญหาที่ทำให้ต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนสูงขึ้น (Niu, 2022)

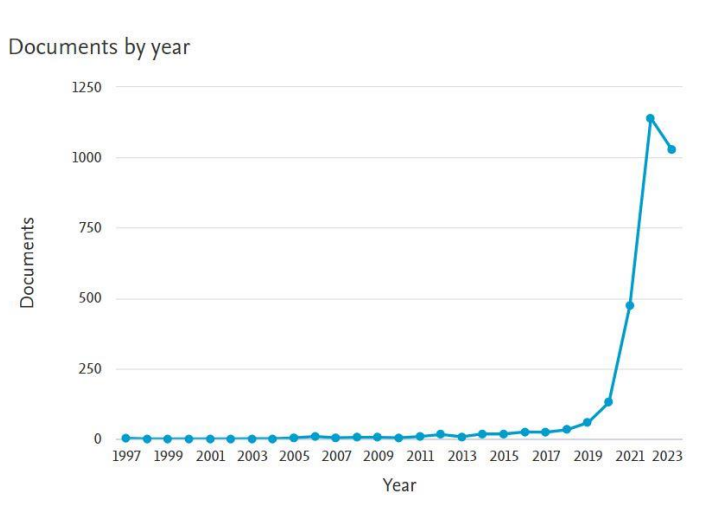
ไฮโดรเจนสีเขียวยังมีความท้าทายในการทำให้เป็นเชิงพาณิชย์ในทุกขั้นตอน ทั้งการผลิต การกักเก็บ การ ขนส่งและการจำหน่าย และการใช้งานปลายทาง สำหรับการผลิตยังมีความท้าทายด้านประสิทธิภาพของพลังงาน ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต อายุการใช้งานของอิเล็กโทรไลเซอร์ต่ำ สำหรับการกักเก็บไฮโดรเจนนั้น มี ต้นทุนสูง ต้องใช้พลังงานสูงในการกักเก็บไฮโดรเจนประเภทที่ผ่านการอัดความดันสูง การกักเก็บไฮโดรเจนใน สถานะของแข็งมีข้อกำหนดเกี่ยวกับอุณหภูมิและความดัน มีความท้าทายด้านออกแบบ กฎหมาย สังคม ความ ปลอดภัย การปนเปื้อนของไฮโดรเจน และอายุการใช้งานของวัสดุที่ใช้ทำที่กักเก็บ สำหรับการขนส่งและการ จำหน่ายไฮโดรเจน การขนส่งผ่านท่อส่งน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติยังมีโครงสร้างพื้นฐานไม่เพียงพอ และการปนกับ ก๊าซธรรมชาติจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของท่ออย่างมีนัยสำคัญ สถานีจ่ายเชื้อเพลิงไฮโดรเจนยังไม่มีควบคุม

ที่ดีสำหรับการไหลของไฮโดรเจนซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียอย่างมีนัยสำคัญ และการเพิ่มสถานีจ่ายเชื้อเพลิง สำหรับขั้นตอนสุดท้ายคือการนำไปใช้ประโยชน์ปลายทาง ความท้าทายรวมถึง การลดน้ำหนัก ปริมาณ ต้นทุนของ ถึงไฮโดรเจนอัดด้วยความดันสูงสำหรับยานยนต์และชุดเซลล์เชื้อเพลิง การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงให้ด้าน ประสิทธิภาพ ความคงทน ขนาด ความหนาแน่น และการย่อยสลาย การพัฒนาระบบควบคุมประสิทธิภาพและ สถานะสุขภาพของระบบ การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา (Bhagavathy & Thakur, 2021)

ประเด็นปัญหาและอุปสรรคของการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวด้วยกำลังการผลิตขนาดใหญ่ประกอบด้วย ต้นทุนสูง ประเด็นเรื่องความเพียงพอของโครงสร้างพื้นฐานรวมทั้งการขนส่งและการกักเก็บ อัตราในการ พัฒนาการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว เทคโนโลยีในแง่ของนวัตกรรมและวิจัยและพัฒนาเพื่อช่วยลดต้นทุน ปรับปรุง ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของหน่วยผลิตอิเล็กโทรไลเซอร์ ความต้องการไฮโดรเจนสีเขียวที่อาจไม่แน่นอน และความชัดเจนด้านมาตรฐานและการรับรองมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (International Renewable Energy Agency, 2022; International Energy Agency, 2023b; International Energy Agency, 2022)

ดังนั้น เพื่อให้ทราบแนวโน้มผลงานวิจัยของโลกที่เกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียว จึงได้มีการวิเคราะห์ข้อมูล ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนสีเขียวในฐานข้อมูล Scopus ในช่วงปี ค.ศ. 2020-2023 เพื่อส่งเสริมการวิจัยที่ เกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวในฐานข้อมูล Scopus



ภาพที่ 1 แสดงจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวจากฐานข้อมูล Scopus ในช่วงปี ค.ศ. 1997 – 2023 สืบค้น ณ วันที่ 30 กรกฎาคม 2566

จากการสืบค้นสารสนเทศเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวในฐานข้อมูล Scopus ณ วันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2566 โดยใช้คำค้น “Green hydrogen” พบว่า มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าจำนวน 3,020 ชื่อเรื่อง โดยเป็นผลงาน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 – 2023 ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวมีอัตราการเติบโตสูงขึ้นในปี ค.ศ. 2019 โดยมีจำนวนผลงานรายปีสูงสุดในปี ค.ศ. 2022 คือ 1,140 ผลงาน และมีจำนวนผลงานวิจัยรายปีต่ำสุดในช่วงปี ค.ศ. 1998 - 2002 คือ 0 ผลงาน จำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 1997 – 2022 คิดเป็น 76.62 ผลงาน/ปี และจำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2022 คิดเป็น 581.67 ผลงาน/ปี มากกว่าจำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 1997 – 2022 คิดเป็นร้อยละ 659.2 แสดงให้เห็นว่าการวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวมีการเติบโตสูงขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 3 ปีที่ผ่านมาเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 1997 – 2022

ผลงานวิจัยล่าสุด 5 อันดับแรก

ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนสีเขียวล่าสุด 5 ผลงาน สืบค้นโดยใช้คำค้น “Green hydrogen” (เลือกเฉพาะบทความ) เมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2566 ได้แก่

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
1. Triphasic Ni ₂ P–Fe ₂ P–CoP heterostructure interfaces for efficient overall water splitting powered by solar energy	2023	1. Chang K./ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 2. Tran D.T./ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 3. Wang J./ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 4. Dong K./ Department of Nano Convergence Engineering,	Applied Catalysis B: Environmental, 338, 123016	0

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
		Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 5. Prabhakaran S. Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 6. Kim D.H./ Division of Science Education, Graduate School of Department of Energy Storage/Conversion Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 7. Kim N.H./ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, South Korea; 8. Lee J.H./ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Jeonju, 54896, South Korea		
2. Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali	2023	1. Maiga O./ IFP-School, IFPEN, Rueil-Malmaison, France; 2. Deville E./ IFP-School, IFPEN, Rueil-Malmaison, France; 3. Laval J./ IFP-School, IFPEN, Rueil-Malmaison, France;	Scientific Reports, 13(1), 11876	0

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
		4. Prinzhofer A./ GEO4U, Rio de Janeiro, Brazil; 5. Diallo A.B./ HYDROMA INC, Montréal, QC, Canada		0
3. Social acceptance of green hydrogen in Germany: building trust through responsible innovation	2023	1. Häußermann J.J./ TUM School of Governance, Technical University of Munich, Munich, Germany; 2. Maier M.J./ Center For Responsible Research and Innovation, Fraunhofer-Institute for Industrial Engineering (IAO), Stuttgart, Germany; 3. Kirsch T.C./ Berlin Graduate School for Global and Transregional Studies (BGTS), Freie Universität Berlin, Berlin, Germany; 4. Kaiser S./ Center For Responsible Research and Innovation, Fraunhofer-Institute for Industrial Engineering (IAO), Stuttgart, Germany; 5. Schraudner M./ acatech-The National Academy of Science and Engineering, Munich, Germany	Energy, Sustainability and Society, 13(1), 22	0

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
4. Endogenous learning for green hydrogen in a sector-coupled energy model for Europe	2023	1. Zeyen E./ Department of Digital Transformation in Energy Systems, Faculty of Process Engineering, TU Berlin, Einsteinufer 25 (TA 8), Berlin, Berlin, 10587, Germany; 2. Victoria M./ Department of Mechanical and Production Engineering, Aarhus University, Inge Lehmanns Gade 10, Aarhus, 8000, Denmark; 3. Brown T./ Department of Digital Transformation in Energy Systems, Faculty of Process Engineering, TU Berlin, Einsteinufer 25 (TA 8), Berlin, Berlin, 10587, Germany	Nature Communications, 14(1), 3743	0
5. Electrochemically Grown Ultrathin Platinum Nanosheet Electrodes with Ultralow Loadings for Energy-Saving and Industrial-Level Hydrogen Evolution	2023	1. Ding L./ Nanodynamics and High-Efficiency Lab for Propulsion and Power, Department of Mechanical, Aerospace & Biomedical Engineering, UT Space Institute (University of Tennessee-Knoxville), Tullahoma, TN, United States; 2. Xie Z./ Nanodynamics and High-Efficiency Lab for	Nano-Micro Letters, 15(1), 144	0

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
		Propulsion and Power, Department of Mechanical, Aerospace & Biomedical Engineering, UT Space Institute (University of Tennessee- Knoxville), Tullahoma, TN, United States; 3. Yu S./ Nanodynamics and High-Efficiency Lab for Propulsion and Power, Department of Mechanical, Aerospace & Biomedical Engineering, UT Space Institute (University of Tennessee- Knoxville), Tullahoma, TN, United States; 4. Wang W./ Nanodynamics and High-Efficiency Lab for Propulsion and Power, Department of Mechanical, Aerospace & Biomedical Engineering, UT Space Institute (University of Tennessee- Knoxville), Tullahoma, TN, United States; 5. Terekhov A.Y./ Center for Laser Applications, UT Space		

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
		Institute (University of Tennessee-Knoxville), Tullahoma, TN, United States; 6. Canfield B.K./ Center for Laser Applications, UT Space Institute (University of Tennessee-Knoxville), Tullahoma, TN, United States; 7. Capuano C.B./ Nel Hydrogen, Wallingford, CT, United States; 8. Keane A./ Nel Hydrogen, Wallingford, CT, United States; 9. Ayers K.๗ Nel Hydrogen, Wallingford, CT, United States; 10. Cullen D.A./ Oak Ridge National Laboratory, Center for Nanophase Materials Sciences, Oak Ridge, TN, United States; 11. Zhang F.-Y./ Nanodynamics and High-Efficiency Lab for Propulsion and Power, Department of Mechanical, Aerospace & Biomedical Engineering, UT Space Institute (University of Tennessee-Knoxville), Tullahoma, TN, United States		

ผลงานที่ 1 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างอินเทอร์เฟซ (Interface) ในเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์ เป็นแบบ triphasic Ni_2P - Fe_2P - CoP heterostructure สำหรับเร่งปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาการเกิดไฮโดรเจนและปฏิกิริยาการเกิดออกซิเจนในตัวทำละลายอัลคาไลน์ พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์ใช้แรงดันไฟฟ้าน้อย (1.51 V for 10 mA/cm^2) และร้อยละการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจนสูงขึ้นเป็น 15.33

ผลงานที่ 2 เป็นเรื่องเกี่ยวกับพื้นที่ Bourakebougou ที่ค้นพบไฮโดรเจนในทุกบ่อที่ถูกเจาะ (25 บ่อ) ในส่วนบนของแหล่งกักเก็บหินปูน และที่กักเก็บหินปูนนี้ส่วนมากจะเชื่อมต่อกันในพื้นที่ทั้งหมด แหล่งกักเก็บไฮโดรเจนที่สำคัญที่สุดในที่ตื้นที่สุดเป็นหินปูนโดโลมิติกและเป็นแหล่งสะสมไฮโดรเจนที่มากที่สุดซึ่งจะระเหยออกเป็นก๊าซ ส่วนในที่ลึกก็สังเกตพบไฮโดรเจนในที่กักเก็บหินทรายบางแห่งและในหินฐานที่มีรอยแตกซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบสารละลาย

ผลงานที่ 3 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการยอมรับไฮโดรเจนสีเขียวในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี โดยสร้างความเชื่อมั่นผ่านนวัตกรรมที่มีความรับผิดชอบต่อสังคม ศึกษาด้วยวิธีผสมผสาน (เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ) ได้แก่ การสัมภาษณ์ถึงโครงสร้าง และการประชุมเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมจำนวน 2 ครั้งในแถบตอนกลางของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ควบคู่ไปกับการสำรวจจากตัวแทน จำนวน 2,054 ราย ไฮโดรเจนสีเขียวเป็นศูนย์กลางในกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางสังคมซึ่งไปด้วยกันกับการเปลี่ยนผ่านพลังงานของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี การยอมรับไฮโดรเจนสีเขียวขึ้นอยู่กับความเชื่อมั่นในวิทยาศาสตร์ รัฐบาล สื่อ และสถาบันที่ให้ความยุติธรรมในการแบ่งปันปันส่วนของต้นทุนและผลประโยชน์ โดยคำนึงถึงคุณค่าของภูมิภาคเป็นหลัก นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการมีส่วนร่วมที่ดีสามารถส่งเสริมการยอมรับและการให้การสนับสนุนอย่างกระตือรือร้น และประสบการณ์ที่ดีจากการมีส่วนร่วมซ้ำ ๆ จะสร้างเสริมให้เกิดความเชื่อมั่นอย่างมีประสิทธิภาพ และการร่วมมือกันในการกำกับดูแลการให้ความรู้เบื้องต้นและใช้งานไฮโดรเจนสีเขียวในบริบทของภูมิภาคจะสร้างเสริมความเชื่อมั่นในระดับโครงสร้างซึ่งจะขจัดความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นในระยะกลางและระยะยาวได้

ผลงานที่ 4 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการสร้างโมเดลต้นทุนของอิเล็กโทรลิซิสที่จับคู่ภาคส่วนของยุโรปอย่างละเอียดโดยมีการคำนึงถึงภาคส่วนที่มีความต้องการไฮโดรเจน การแปรปรวนชั่วคราวของระบบ และผลกระทบของการเรียนรู้ด้วยการปฏิบัติตลอดห่วงโซ่การผลิตไฮโดรเจนสีเขียว และแสดงให้เห็นว่าถ้าเพิ่มขนาดของอิเล็กโทรลิซิสและกำลังการผลิตพลังงานหมุนเวียนในสิบปีข้างหน้าให้มากกว่าที่คาดการณ์ในแผนจัดการพลังงานของสหภาพยุโรป (REPowerEU Plan) สามารถทำให้ต้นทุนมีค่าต่ำสุดสำหรับเป้าหมายภาวะโลกร้อนที่ $+1.5$ องศาเซลเซียส ทำให้ต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนเป็น 1.26 ปอนด์/กิโลกรัม ภายในปี ค.ศ. 2050

ผลงานที่ 5 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการออกแบบอิเล็กโทรดที่รวมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแผ่นนาโนแพลทินัมแบบบางพิเศษที่จัดเรียงในแนวตั้งซึ่งใช้ปริมาณแพลทินัมต่ำมาก มีการใช้ประโยชน์ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง มีกระบวนการผลิตที่ง่าย สำหรับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวผ่านเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์ชนิดที่เป็นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane electrolyzer cells - PEMECs) ให้มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ และประหยัดตัวเร่งปฏิกิริยาถึงร้อยละ 99.5

จากผลงานวิจัยล่าสุด 5 ผลงานพบว่า 2 ใน 5 ผลงาน (ผลงานที่ 1 และผลงานที่ 5) จะเป็นการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาในเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสำหรับผลงานที่ 5 การออกแบบที่เป็นลักษณะแผ่นนาโนแพลทินัมบางพิเศษที่ใช้ปริมาณแพลทินัมน้อย ประหยัดตัวเร่งปฏิกิริยาถึงร้อยละ 99.5 และทำให้ต้นทุนต่ำ ถ้าพิจารณาเกี่ยวกับต้นทุนในการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวผลงานที่ 4 และผลงานที่ 5 เป็นงานวิจัยที่มุ่งที่จะทำให้ต้นทุนในการผลิตไฮโดรเจนต่ำลง ส่วนผลงานที่ 2 จะเป็นทางเลือกในการนำไฮโดรเจนจากธรรมชาติหรือแหล่งกักเก็บหินปูนมาใช้ และผลงานที่ 3 จะเป็นการสร้างความเชื่อมั่นผ่านนวัตกรรมที่มีความรับผิดชอบต่อสังคม เพื่อให้สังคมในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนียอมรับไฮโดรเจนสีเขียว เพื่อป้องกันความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

พิจารณาจากผู้แต่งของผลงานวิจัยล่าสุด 5 ผลงานพบว่า 2 ใน 5 ผลงาน (ผลงานที่ 3 และผลงานที่ 4) มีผู้แต่งสังกัดสถาบันในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี แสดงให้เห็นว่า มีความสนใจด้านการยอมรับของสังคมเกี่ยวกับพลังงานไฮโดรเจน และการลดต้นทุนของการผลิตไฮโดรเจน และในผลงานที่ 4 มีผู้แต่งสังกัดสถาบันในราชอาณาจักรเดนมาร์กซึ่งเป็นเรื่องเกี่ยวกับโมเดลต้นทุนของอิเล็กโทรลิซิส สำหรับผลงานที่ 1 ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐเกาหลี แสดงถึงความสนใจในการออกแบบอินเทอร์เฟซในตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพสูง สำหรับผลงานที่ 2 ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐฝรั่งเศส สหพันธ์สาธารณรัฐบราซิล และแคนาดา แสดงถึงความสนใจในไฮโดรเจนที่มีอยู่ในแหล่งกักเก็บหินปูน และผลงานที่ 5 ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสหรัฐอเมริกาแสดงถึงความสนใจในการออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำโดยใช้ผ่านแผ่นนาโนแพลทินัมบางพิเศษ

ผลงานวิจัยที่ถูกอ้างอิงสูงสุด 5 อันดับแรก

ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนสีเขียวที่มีการอ้างอิงสูงสุด 5 ชื่อเรื่องแรก สืบค้นโดยใช้คำค้น “Green hydrogen” (เลือกเฉพาะบทความ) เมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2566 ได้แก่

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/ สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
1. The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO2 Emissions Chemical Industry	2020	1. Gabrielli, P./ Institute of Process Engineering, Eth Zurich, Switzerland; 2. Gazzani, M./ Utrecht University, Copernicus Institute of Sustainable Development, Netherlands; 3. Mazzotti, M./ Institute of Process Engineering, Eth Zurich, Switzerland	Industrial and Engineering Chemistry Research, 59(15), pp. 7033–7045	206
2. Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables	2021	1. Kakoulaki, G./ European Commission, Joint Research Centre (JRC), Italy; 2. Kougias, I./ European Commission, Joint Research Centre (JRC), Italy; 3. Taylor, N./ European Commission, Joint Research Centre (JRC), Italy; 4. Dolci, F./ European Commission, Joint Research Centre, Netherlands; 5. Moya, J./ European Commission, Joint Research Centre, Netherlands; 6. Jäger-Waldau, A./ European Commission, Joint Research Centre (JRC), Italy	Energy Conversion and Management, 228, 113649	190

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/ สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
3. The role of new energy in carbon neutral	2021	1. ZOU, C./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 2. XIONG, B./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 3. XUE, H./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 4. ZHENG, D./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 5. GE, Z./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 6. WANG, Y./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 7. JIANG, L./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 8. PAN, S./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China; 9. WU, S./ PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing, China	Petroleum Exploration and Development, 48 (2), pp. 480–491	184

ชื่อผลงาน	ปี ค.ศ.	ผู้แต่ง/ สถาบัน	ชื่อวารสาร	จำนวนที่ ถูกอ้างอิง
4. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen	2021	1. Yu, M./ College of Economics and Management, Changzhou Institute of Technology, China; 2. Wang, K./ Haskayne School of Business, University of Calgary, Canada; 3. Vredenburg, H./ Haskayne School of Business, University of Calgary, Canada	International Journal of Hydrogen Energy, 46(41), pp. 21261–21273	166
5. Flexible production of green hydrogen and ammonia from variable solar and wind energy: Case study of Chile and Argentina	2020	1. Armijo, J./ Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad, Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago, Chile; 2. Philibert, C./ International Energy Agency, OECD, France	International Journal of Hydrogen Energy, 45(3), pp. 1541–1558	165

ผลงานวิจัยที่ถูกอ้างอิงมากที่สุดอันดับที่ 1 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงแนวคิดและการประเมินเปรียบเทียบเชิงปริมาณของสามห่วงโซ่เทคโนโลยี ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นไปได้ที่จะนำไปสู่อุตสาหกรรมเคมีที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์ได้เท่านั้น แต่ละห่วงโซ่เทคโนโลยีมีข้อดีและข้อเสีย ไม่สามารถบอกได้ว่าห่วงโซ่เทคโนโลยีใดดีที่สุด ห่วงโซ่เทคโนโลยี 3 ห่วงโซ่ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของ (1) การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และกระบวนการทางเคมีและโครงสร้างพื้นฐานในปัจจุบันควบคู่ไปกับการดักจับและกักเก็บคาร์บอน (2) การใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับมาเป็นวัตถุดิบร่วมกับไฮโดรเจนสีเขียวในกระบวนการทางเคมีใหม่ (3) การใช้มวลชีวภาพที่ปลูกและทำให้ผ่านกระบวนการสำหรับวัตถุดิบประสงค์เฉพาะของการผลิตสารเคมี

ผลงานอันดับที่ 2 เป็นเรื่องเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวในยุโรป เป็นการสำรวจความสามารถในการแทนที่การผลิตไฮโดรเจนในปัจจุบันซึ่งปล่อยคาร์บอนจำนวนมากด้วยอิเล็กโทรลิซิสของน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงาน

หมุนเวียน ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว โดยประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคของแหล่งพลังงานหมุนเวียนในระดับภูมิภาคและระดับชาติ และโดยคำนึงถึงข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการใช้ที่ดิน และตัวแปรเชิงเศรษฐกิจและเทคโนโลยีต่าง ๆ พบว่า ในระดับชาติ ศักยภาพของไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ประโยชน์มีมากกว่าความต้องการไฟฟ้าทั้งหมดและในส่วนของผลิตไฮโดรเจนจากอิเล็กโทรลิซิสของทุกประเทศที่ถูกวิเคราะห์ ส่วนในระดับภูมิภาคนั้น 88 ภูมิภาคจาก 109 ภูมิภาคที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจน แสดงส่วนเกินของการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนหลังจากครอบคลุมความต้องการไฟฟ้ารายปีตลอดทุกภาคส่วนและการผลิตไฮโดรเจนแล้ว การศึกษานี้มีเป้าหมายที่จะเป็นเครื่องมือในการออกแบบกลยุทธ์ที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนให้สอดคล้องกับนโยบายพลังงานหมุนเวียน

ผลงานอันดับที่ 3 เป็นเรื่องเกี่ยวกับบทบาทของพลังงานใหม่ในการเป็นกลางทางคาร์บอน แนวทางหลักในการบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน ได้แก่ การทดแทนคาร์บอน (carbon replacement) การลดการปล่อยคาร์บอน (carbon emission reduction) การกักเก็บคาร์บอน (carbon sequestration) และวัฏจักรคาร์บอน (carbon cycle) ในปัจจุบันพลังงานใหม่รวมถึงพลังงานไฮโดรเจนซึ่งช่วยลดการปล่อยคาร์บอน เทคโนโลยีในการเปลี่ยนคาร์บอนที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจะช่วยเชื่อมพลังงานใหม่และพลังงานฟอสซิล ในการศึกษาครั้งนี้คาดการณ์ว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนของสาธารณรัฐประชาชนจีนจะสูงสุดในปี ค.ศ. 2030 และลดลงในปี ค.ศ. 2060 เพื่อการตระหนักถึงความเป็นกลางทางคาร์บอน จึงมีการเสนอแนะข้อแนะนำในการปฏิบัติ 7 ประการ เพื่อสร้างโครงสร้างพลังงานแบบ “สามเล็กและหนึ่งใหญ่” (หมายถึงการใช้พลังงานจากถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติจะลดลงและการใช้พลังงานใหม่จะสูงขึ้น) ในสาธารณรัฐประชาชนจีน และส่งเสริมการตระหนักถึงกลยุทธ์ความเป็นเอกเทศด้านพลังงานของสาธารณรัฐประชาชนจีน

ผลงานอันดับที่ 4 เป็นเรื่องเกี่ยวกับความเข้าใจอย่างลึกซึ้งเกี่ยวกับวิธีผลิตไฮโดรเจนคาร์บอนต่ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนสีเขียว ไฮโดรเจนสีน้ำเงิน และอะควาไฮโดรเจน (ผลิตจากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลแต่ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์) ซึ่งมีกระบวนการผลิตที่ไม่มีคาร์บอน และจะเป็นสิ่งสำคัญในการลดคาร์บอนในภาคส่วนใหญ่ ๆ ของเศรษฐกิจโลก และเกี่ยวกับความท้าทายในการพัฒนาการผลิตไฮโดรเจนคาร์บอนต่ำทั้งสามชนิด ซึ่งครอบคลุมทั้งต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนและด้านความกังวลใจเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม ทิศทางในอนาคต และข้อเสนอแนะด้านนโยบาย

ผลงานอันดับที่ 5 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวและแอมโมเนียแบบยืดหยุ่นจากพลังงานแสงอาทิตย์และลมที่ผันแปร กรณีศึกษาของสาธารณรัฐชิลีและสาธารณรัฐอาร์เจนตินา พบว่า การผสมระหว่างลมและแสงอาทิตย์สามารถลดต้นทุนการผลิตไฮโดรเจนได้แต่ไม่มาก สำหรับการผลิตแอมโมเนียการผสมระหว่างลม

และแสงอาทิตย์สามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าเป็นอย่างมาก การศึกษานี้คาดว่าจะลดต้นทุนการผลิตในอนาคตอันใกล้ของไฮโดรเจนเท่ากับ 2 ดอลลาร์สหรัฐ/กิโลกรัม และของแอมโมเนียสีเขียวต่ำกว่า 500 ดอลลาร์สหรัฐ/ตัน มีความใกล้เคียงกับความสามารถในการแข่งขันกับการผลิตด้วยเชื้อเพลิงฟอสซิล

จากผลงานวิจัยที่ถูกอ้างอิงมากที่สุด 5 อันดับแรก พบว่า มีผลงานเกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว/ไฮโดรเจนคาร์บอนต่ำที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์หรือปล่อยคาร์บอนต่ำ จำนวน 2 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 4 และผลงานอันดับที่ 5) แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ผลิตไฟฟ้าสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสน้ำ จำนวน 2 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 2 และผลงานอันดับที่ 5) วิธีที่เป็นไปได้ที่จะนำไปสู่อุตสาหกรรมเคมีที่ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์/ความสามารถในการแทนที่การผลิตไฮโดรเจนในปัจจุบันซึ่งปล่อยคาร์บอนจำนวนมากด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของน้ำโดยใช้ไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ปล่อยคาร์บอนเป็นศูนย์ (การผลิตไฮโดรเจนสีเขียว) จำนวน 2 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 1 และผลงานอันดับที่ 2) การลดต้นทุนการผลิตไฮโดรเจน จำนวน 2 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 4 และผลงานอันดับที่ 5) และบทบาทของพลังงานใหม่รวมทั้งไฮโดรเจนสีเขียวในความเป็นกลางทางคาร์บอน จำนวน 1 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 3)

พิจารณาด้านผู้แต่งของผลงานวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวในช่วงปี ค.ศ. 2020 - 2023 ที่ได้รับการอ้างอิงสูงสุด 5 อันดับแรกพบว่า ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้แต่งของ 2 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 3 และผลงานอันดับที่ 4) ผู้แต่งสังกัดสถาบันในราชอาณาจักรเนเธอร์แลนด์เป็นผู้แต่งของ 2 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 1 และผลงานอันดับที่ 2) ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสมาพันธรัฐสวิสเป็นผู้แต่งของ 1 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 1) ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐอิตาลีเป็นผู้แต่งของ 1 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 2) ผู้แต่งสังกัดสถาบันในแคนาดาเป็นผู้แต่งของ 1 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 4) ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐฝรั่งเศสเป็นผู้แต่งของ 1 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 5) และผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐชิลีเป็นผู้แต่งของ 1 ผลงาน (ผลงานอันดับที่ 5)

ผู้แต่งที่มีจำนวนผลงานมากที่สุด 5 อันดับแรก

สำหรับผู้แต่งที่มีจำนวนผลงานที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนสีเขียวมากที่สุด 5 อันดับแรก โดยใช้คำค้น “Green hydrogen” ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 สืบค้นเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2566 ได้แก่ Lee, Joonghee, Kim, Namhoon, Thanh, Tran Duy, Dincer, Ibrahim, และ Lim, Hankwon

ผู้แต่ง	จำนวนผลงานเกี่ยวกับ “Green hydrogen” (ปีค.ศ. 2020-2023)	จำนวนผลงานรวม	สถาบันที่สังกัด	จำนวนที่ถูกอ้างอิง	h-index
1. Lee, Joonghee	19	474	Jeonbuk National University, Jeonju, South Korea	32,410	84
2. Kim, Namhoon	18	354	Jeonbuk National University, Jeonju, South Korea	26,726	81
3. Thanh, Tran Duy	16	92	Jeonbuk National University, Jeonju, South Korea	3,865	38
4. Dincer, Ibrahim	11	1,484	Ontario Tech University, Oshawa, Canada	64,241	119
5. Lim, Hankwon	10	181	Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea	2,764	29

พบว่า ผู้แต่งอันดับที่ 1 อันดับที่ 2 อันดับที่ 3 และอันดับที่ 5 เป็นผู้แต่งที่สังกัดสถาบันในสาธารณเกาหลี คือ สังกัด Jeonbuk National University และ Ulsan National Institute of Science and Technology ในขณะที่ผู้แต่งอันดับที่ 4 เป็นผู้แต่งที่สังกัดสถาบันในแคนาดา คือ สังกัด Ontario Tech University

สถาบันที่มีจำนวนผลงานมากที่สุด 5 อันดับแรก

สำหรับสถาบันที่มีจำนวนผลงานที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนสีเขียวมากที่สุด 5 อันดับแรก โดยใช้คำค้น “Green hydrogen” ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 สืบค้นเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2566 ได้แก่ Ministry of

Education, China, Chinese Academy of Sciences, Tsinghua University, CNRS Centre National de la Recherche Scientifique และ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR

สถาบันที่สังกัด	ประเทศ	จำนวนผลงาน
1. Ministry of Education China	สาธารณรัฐประชาชนจีน	81
2. Chinese Academy of Sciences	สาธารณรัฐประชาชนจีน	67
3. Tsinghua University	สาธารณรัฐประชาชนจีน	40
4. CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	สาธารณรัฐฝรั่งเศส	33
5. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR	สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	28

จากการวิเคราะห์พบว่า สถาบันอันดับที่ 1 สถาบันอันดับที่ 2 และสถาบันอันดับที่ 3 เป็นสถาบันในสาธารณรัฐประชาชนจีน โดย Ministry of Education China มีผลงานมากที่สุดเป็นอันดับที่ 1 ต่างจาก Chinese Academy of Sciences ซึ่งเป็นอันดับที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 20.9 ในขณะที่ Chinese Academy of Sciences ต่างจาก Tsinghua University ซึ่งเป็นอันดับที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญ คิดเป็นร้อยละ 67.5 ในขณะที่ Tsinghua University ต่างจาก CNRS Centre National de la Recherche Scientifique ของสาธารณรัฐฝรั่งเศส ซึ่งเป็นอันดับที่ 4 คิดเป็นร้อยละ 21.2 และ CNRS Centre National de la Recherche Scientifique ต่างจาก Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR ของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ซึ่งเป็นอันดับที่ 5 คิดเป็นร้อยละ 17.9 แสดงให้เห็นว่าในสาธารณรัฐประชาชนจีนให้ความสำคัญกับการวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวเป็นอย่างมากในระดับสถาบัน เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตไฮโดรเจนสีเขียวและการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

ประเทศที่มีจำนวนผลงานมากที่สุด 5 อันดับแรก

ประเทศที่มีผลงานในฐานข้อมูล Scopus เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนสีเขียวมากที่สุด 5 อันดับแรก โดยใช้คำค้น “Green hydrogen” ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 สืบค้นเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2566 ได้แก่ สาธารณรัฐประชาชนจีน สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี สหรัฐอเมริกา สาธารณรัฐอิตาลี และสาธารณรัฐเกาหลี โดยมีจำนวนผลงาน ดังนี้

ประเทศ	จำนวนผลงาน
สาธารณรัฐประชาชนจีน	679
สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี	273
สหรัฐอเมริกา	237
สาธารณรัฐอิตาลี	224
สาธารณรัฐเกาหลี	201

จากการวิเคราะห์ร้อยละความแตกต่างของจำนวนผลงานของแต่ละประเทศ พบว่า สาธารณรัฐประชาชนจีนมีจำนวนผลงานมากที่สุด ซึ่งมากกว่าของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ซึ่งเป็นอันดับที่ 2 คิดเป็นร้อยละ 148.7 สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีมีจำนวนผลงานมากกว่าของสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นอันดับที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 15.2 สหรัฐอเมริกามีจำนวนผลงานมากกว่าของสาธารณรัฐอิตาลีซึ่งเป็นอันดับที่ 4 คิดเป็นร้อยละ 5.8 สาธารณรัฐอิตาลีมีจำนวนผลงานมากกว่าสาธารณรัฐเกาหลีซึ่งเป็นอันดับที่ 5 คิดเป็นร้อยละ 11.4 แสดงให้เห็นว่า สาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้นำที่โดดเด่นด้านการวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 โดยมีจำนวนผลงานในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 แตกต่างจากสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีที่เป็นอันดับที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ

สรุปแนวโน้มการวิจัย

จากการวิเคราะห์ผลงานวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวจากฐานข้อมูล Scopus สืบค้นโดยใช้คำค้น “Green hydrogen” ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 และสืบค้นเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2566 พบว่า การวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเจนสีเขียวมีการเติบโตสูงขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 3 ปีที่ผ่านมาเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 1997 – 2022 (จำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2022 คิดเป็น 581.67 ผลงาน/ปี มากกว่าจำนวนผลงานเฉลี่ยต่อปีในช่วงปี ค.ศ. 1997 – 2022 (76.62 ผลงาน/ปี) คิดเป็นร้อยละ 659.2) และจากการวิเคราะห์ผลงานวิจัยล่าสุด 5 อันดับแรก และผลงานวิจัยที่ได้รับการอ้างอิงมากที่สุด 5 อันดับแรก พบว่า ผลงานวิจัยเป็นเรื่องเกี่ยวกับการลดต้นทุนการผลิตไฮโดรเจน จำนวน 4 ผลงาน ลดต้นทุนด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้เทคโนโลยีใหม่ในการผลิตไฮโดรเจนจากพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การบริหารจัดการการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพด้วยการใช้พลังงานลมร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ และการสร้างโมเดลต้นทุนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ผลงานวิจัยเป็นเรื่องเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยา จำนวน 2 ผลงาน เป็นเรื่องเกี่ยวกับการประเมินศักยภาพเชิงเทคนิคของแหล่งพลังงานหมุนเวียนในระดับภูมิภาคและระดับชาติ โดยคำนึงถึงข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการ

ใช้ที่ดิน และตัวแปรเชิงเศรษฐกิจและเทคโนโลยีต่าง ๆ เป็นเรื่องเกี่ยวกับวิธีที่เป็นไปได้ของอุตสาหกรรมเคมีที่จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิเป็นศูนย์ ความสามารถในการแทนที่การผลิตไฮโดรเจนส่วนใหญ่ในปัจจุบันที่ปล่อยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสด้วยไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนหรือการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว เป็นเรื่องเกี่ยวกับบทบาทของพลังงานใหม่ และการยอมรับของสังคมในการให้ความรู้เบื้องต้นและการนำไฮโดรเจนสีเขียวมาใช้งาน

จากการวิเคราะห์ผู้แต่งที่มีจำนวนผลงานมากที่สุด 5 อันดับแรกในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 พบว่า ผู้แต่งสังกัดสถาบันในสาธารณรัฐเกาหลีมีความโดดเด่นมากที่สุด (มีจำนวน 4 คน) และรองลงมาเป็นผู้แต่งสังกัดสถาบันในแคนาดา (มีจำนวน 1 คน) สำหรับสถาบันที่มีจำนวนผลงานมากที่สุด 5 อันดับแรกในช่วงปีเดียวกันพบว่า สถาบันในสาธารณรัฐประชาชนจีนมีความโดดเด่นมากที่สุด (จำนวน 3 สถาบัน) รองลงมาเป็นสถาบันในสาธารณรัฐฝรั่งเศส (จำนวน 1 สถาบัน) และสถาบันในสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี (จำนวน 1 สถาบัน) และประเทศที่มีจำนวนผลงานมากที่สุด 5 อันดับแรก ในช่วงปี ค.ศ. 2020 – 2023 พบว่า สาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้นำที่โดดเด่นมากเหนือประเทศอื่นๆ รองลงมาเป็นสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี สหรัฐอเมริกา สาธารณรัฐอิตาลี และสาธารณรัฐเกาหลี ตามลำดับ

บรรณานุกรม

โลกสีฟ้า (นามแฝง). (2565, 5 กุมภาพันธ์). *อิเล็กโทรไลเซอร์ Electrolyzer ในระบบเศรษฐกิจ และสังคมสีเขียว*.

The Key News. <https://thekey.news/columnists/energykey/60319/>

วิชาญ นาคทอง. (ม.ป.ป.). *ประเภทของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน (Types of hydrogen fuel)*. iEnergyGuru.

[https://ienergyguru.com/2022/06/types-of-hydrogen-fuel/#:~:text=เชื้อเพลิงชีวมวลใช้ผลิต,\(Red%20hydrogen\)%20%5B8%5D](https://ienergyguru.com/2022/06/types-of-hydrogen-fuel/#:~:text=เชื้อเพลิงชีวมวลใช้ผลิต,(Red%20hydrogen)%20%5B8%5D)

สำนักงานที่ปรึกษาด้านอุตสาหกรรมในต่างประเทศ ประจำกรุงเวียนนา. (2565, 29 เมษายน). *แผน REPowerEU*

ลดการพึ่งพาและเพิ่มความยั่งยืนให้แก่ระบบพลังงานของสหภาพยุโรป. กระทรวงอุตสาหกรรม.

<https://thaiindustrialoffice.wordpress.com/2022/04/29/แผน-repowereu-ลดการพึ่งพาและเพิ่/>

Bhagavathy, S. & Thakur, J. (2021, February). *Green Hydrogen: Challenges for Commercialization*.

IEEE Smart Grid. <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/february-2021/green-hydrogen-challenges-for-commercialization>

ExxonMobil. (2564, 1 กันยายน). *ไฮโดรเจนสีน้ำเงินและไฮโดรเจนสีเขียวคืออะไร?.* Energy Factor.
<https://energyfactor.exxonmobil.asia/th/reducing-emissions/alternative-fuels/blue-green-hydrogen/>

European Commission. (n.d.). *REPowerEU at a glance.* https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en

European Commission. (2022, May 18). *REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition.* https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131

International Energy Agency. (2022, September). *Global Hydrogen Review 2022.* <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>

International Energy Agency. (2023a, January). *Hydrogen patents for a clean energy future: A global trend analysis of innovation along hydrogen value chains.* <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1b7ab289-ecbc-4ec2-a238-f7d4f022d60f/Hydrogenpatentsforacleanenergyfuture.pdf>

International Energy Agency. (2023b, April). *Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity.* <https://iea.blob.core.windows.net/assets/acc7a642-e42b-4972-8893-2f03bf0bfa03/Towardshydrogendefinitionsbasedontheiremissionsintensity.pdf>

International Renewable Energy Agency. (2022, January). *Enabling Measures Roadmap for Green Hydrogen.* https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Press-Release/2021/Nov/Enabling_Measures_Roadmap_for_Green_H2_Jan22_Vf.pdf?la=en&hash=C7E5B7C0D63A0A68C704A019CE81D1B6AA5FBD75

KBR. (n.d.). *What Are Energy Vectors?.* <https://www.kbr.com/sites/default/files/2021-02/What%20Are%20Energy%20Vectors%20-%20No%201.pdf>

- Keating, D. (2023, February 20). *EU sets out rules for green hydrogen – inviting promise and peril*. Energy Monitor. <https://www.energymonitor.ai/tech/hydrogen/eu-sets-out-rules-for-green-hydrogen-inviting-promise-and-peril/#:~:text=New%20EU%20green%20hydrogen%20rules&text=The%20act%20requires%20proof%20that,no%20older%20than%2036%20months>.
- Moore, S. (2022, August 30). *What is Green Hydrogen Used For?*. AZoCleantech. <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1614>
- National Portal of India. (n.d.). *National Green Hydrogen Mission*. <https://www.india.gov.in/spotlight/national-green-hydrogen-mission>
- Niu, Y. (2022, October 11). *By-product hydrogen: a bridge to a green hydrogen economy?*. China Dialogue. https://chinadialogue.net/en/energy/by-product-hydrogen-a-bridge-to-a-green-hydrogen-economy/?amp&gclid=Cj0KCQjwmlCoBhDxARIsABXkXLrAE96C67aSKxihdRC1CbOLYMPQOgChrN8Mx0lljstandEVpS8WAQaAqz0EALw_wcB
- Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2017, October 4). *5 Fast Facts about Hydrogen and Fuel Cells*. <https://www.energy.gov/eere/articles/5-fast-facts-about-hydrogen-and-fuel-cells>
- Singh, S. C. (2023, July 10). *Factbox: India's green hydrogen push and challenges*. Reuters. <https://www.reuters.com/world/india/indias-green-hydrogen-push-challenges-2023-07-10/#:~:text=Green%20hydrogen%20is%20currently%20more,storage%20is%20still%20not%20economical>.
- Vechkinzova, E., Steblyakova, L. P., Roslyakova, N., & Omarova, B. (2022, December 6). *Hydrogen Energy in Russian*. Scholarly Community Encyclopedia. <https://encyclopedia.pub/entry/37589>
- Zeyen, E., Victoria, M. & Brown, T. (2023). Endogenous learning for green hydrogen in a sector-coupled energy model for Europe. *Nature Communications*, 14(3743). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39397-2>

Zou, C., Xiong, B., Xue, H., Zheng, D., Ge, Z., Wang, Y., Jiang, L., Pan, S., & Wu, S. (2021). The role of new energy in carbon neutral. *Petroleum Exploration and Development*, 48(2), 480-491.
[https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(21\)60039-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(21)60039-3)