การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง

ประวรรธน์ สุขพูล[๑] และ อลิศรา เรืองแสง[๑,๒]

[๑]สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[๒]ภาคีสมาชิก สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ประเภทวิชาเทคโนโลยี สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา, alissara@kku.ac.th

บทนำ

ไฮโดรเจนเป็นพาหะพลังงาน (energy carrier) โดยมีพลังงานต่อหน่วยน้ำหนัก (energy density) สูงกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล การเผาไหม้ไฮโดรเจนจะปราศจากการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จึงจัดเป็นพลังงานสะอาด การผลิตไฮโดรเจนโดยชีววิธีมีกระบวนการหลัก ๒ กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการหมักแบบไร้อากาศไม่ใช้แสง และกระบวนการหมักแบบไร้อากาศและใช้แสง บทความนี้จะกล่าวถึงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง และข้อจำกัดของการใช้พลังงานไฮโดรเจน

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสงคือกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกลุ่มจุลินทรีย์ไม่ใช้อากาศภายใต้ภาวะไร้อากาศและไม่ต้องการพลังงานจากแสง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ ไฮโดรเจน และผลิตภัณฑ์ร่วมจากกระบวนการ คือ คาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมันระเหยง่าย (Bari et al., 2022) การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง มีข้อดี คือ รูปแบบของถังปฏิกรณ์เรียบง่าย ในการผลิตสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายชนิด และต้องการพลังงานต่ำในการดำเนินระบบ (Bari et al., 2022) อย่างไรก็ตาม ผลได้ไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง จัดว่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบอื่น ๆ เพราะเมื่อใช้กลูโคสเป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง จะได้ผลได้ไฮโดรเจนสูงสุด ๔ โมลต่อโมลกลูโคส โดยที่ผลิตภัณฑ์ร่วมคือกรดแอซีติกเท่านั้น (คิดเป็น ๓๓ เปอร์เซ็นต์ของผลได้ไฮโดรเจนทางทฤษฎี) หากผลิตภัณฑ์ร่วมคือ กรดบิวทิริกเท่านั้น จะได้ผลได้ไฮโดรเจน ๒ โมลต่อโมลกลูโคส แต่ทว่าในทางปฏิบัติ ผลได้ไฮโดรเจนสูงสุดคือ ๔ โมลต่อโมลกลูโคส ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้พลังงานจากสารอินทรีย์เพื่อการเจริญและกิจกรรมต่าง ๆ ภายในเซลล์ (Wang and Yin, 2021) นอกจากนี้ สารยับยั้งบางชนิดอาจส่งผลให้ผลได้ไฮโดรเจนลดลง ได้แก่ สารยับยั้งอนินทรีย์ (เช่น โลหะหนัก แอมโมเนีย ซัลเฟต) สารยับยั้งอินทรีย์ (เช่น สารประกอบฟีนอล อนุพันธ์ของฟูแรน) และสารยับยั้งชีวภาพ (เช่น แบคทีริโอซิน) (Chen et al., 2021) การสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายที่เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง อาจส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนถูกยับยั้งได้ เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักลดลง ส่งผลให้วิถีการผลิตไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนเป็นวิถีการผลิต

ตัวทำละลาย เช่น เอทานอล นอกจากนั้น ความเป็นพิษจากกรดที่ไม่แตกตัวส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนถูกยับยั้งได้เช่นกัน (Yin et al., 2022) ปัจจุบันมีผู้พัฒนากระบวนการหมักแบบลูกผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้ผลได้ไฮโดรเจนสูงขึ้น (ตารางที่ ๑) ได้แก่ กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง ร่วมกับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ใช้แสง และกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง ร่วมกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสจุลินทรีย์ (Singh and Das, 2019) จากตารางที่ ๑ จะเห็นได้ว่า กระบวนการหมักแบบลูกผสม (แบบสองขั้นตอน) ให้ผลได้ไฮโดรเจนสูงกว่ากระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง เพียงขั้นตอนเดียว

ตารางที่ ๑ เปรียบเทียบผลได้ไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง กับกระบวนการหมักแบบลูกผสม

กระบวนการหมัก	วัตถุดิบ	จุลินทรีย์	ผลได้ไฮโดรเจน		ที่มา
			ขั้นตอนที่ ๑	ขั้นตอนที่ ๒	
กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง	น้ำเสียโรงงานแป้งมัน	กากตะกอนจุลินทรีย์	๑๘๕.๕ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	-	(Mahata et al., 2020)
	กากกาแฟ	กากตะกอนจุลินทรีย์	๔๙.๒ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	-	(Miñón-Fuentes and Aguilar-Juárez, 2019)
กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง ร่วมกับการหมักแบบไร้อากาศ ใช้แสง	หางนม	*Enterobacter aerogenes* และ *Rhodobacter sphaeroides*	๑๔๐.๗๒ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	๒๒๔.๓๘ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	(Rao and Basak, 2022)
	กลูโคส	กล้าเชื้อผสม	๑๓๒.๙๖ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	๒๒๐.๗๖ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	(Cai et al., 2019)
กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง ร่วมกับเซลล์อิเล็กโทรไลซิสจุลินทรีย์	น้ำทิ้งโรงงานปาล์มน้ำมัน	*Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum* และกากตะกอนจุลินทรีย์	๗๓ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	๑๖๓ มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี	(Khongkliang et al., 2019)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตไฮโดรเจน

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง เป็นกระบวนการทางชีวภาพ การควบคุมปัจจัยทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพจะส่งผลให้ได้ผลได้ไฮโดรเจนสูงขึ้น ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่

อุณหภูมิ

อุณหภูมิในกระบวนการหมักจะควบคุมอัตราการเจริญของจุลินทรีย์และส่งเสริมการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ในภาวะอุณหภูมิปานกลาง (๒๕–๔๕ องศาเซลเซียส) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะส่งผลให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนและผลได้ไฮโดรเจนสูงขึ้น เนื่องจากเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนมีกิจกรรมสูงสุดในช่วงอุณหภูมิปานกลาง ขณะที่ในภาวะอุณหภูมิสูง (๔๕–๖๕ องศาเซลเซียส) จะให้ผลได้ไฮโดรเจนสูงที่สุด เนื่องจากจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์ได้ดี และมีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ชนิดอื่นในระบบลดลง (Kumari and Das, 2017) อย่างไรก็ตาม การผลิตไฮโดรเจนโดยรวมจะเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ ๓๙ องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสียสภาพของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจน (Bari et al., 2022) ดังนั้น ควรมีการทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างส่งผลอย่างมากต่อการเจริญของจุลินทรีย์และผลิตภัณฑ์จากกระบวนการหมัก โดยที่การเจริญของจุลินทรีย์จะถูกยับยั้งเมื่ออยู่ในภาวะที่เป็นกรดหรือด่างมากเกินไป (ต่ำกว่า ๓ หรือมากกว่า ๑๒) (Singh et al., 2021) ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมของการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง จะอยู่ในช่วง ๕.๕–๖.๕ ซึ่งเป็นภาวะที่เหมาะแก่การเจริญของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน และสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Soares et al., 2020) อย่างไรก็ตาม การสะสมของผลิตภัณฑ์ร่วมระหว่างกระบวนการหมัก คือ กรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดแอซีติก กรดบิวทีริก จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ หากความเป็นกรด-ด่างในกระบวนการหมักมีค่าต่ำกว่า ๔.๐ การผลิตไฮโดรเจนจะถูกยับยั้ง (Singh et al., 2021)

ธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง

ธาตุอาหารหลัก เช่น คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส มีความสำคัญสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์ โดยที่อัตราส่วนที่เหมาะแก่การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง คือ คาร์บอน:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ ๑๐๐:๐.๕:๐.๑ โดยน้ำหนัก (Argun et al., 2008) ส่วนธาตุอาหารรอง คือ ไอออนของโลหะ ได้แก่ โซเดียมไอออน (Na^+) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ซิงก์ไอออน (Zn^{2+}) และเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) จะทำหน้าที่เป็นปัจจัยร่วม (cofactor) ของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส และส่งเสริมการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในกระบวนการทางชีวภาพภายในเซลล์จุลินทรีย์ (Argun et al., 2008) ธาตุอาหารรองจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง เช่นกัน

กล้าเชื้อ

จุลินทรีย์ผสม (mixed culture) มักจะใช้เป็นกล้าเชื้อในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง มากกว่าจุลินทรีย์บริสุทธิ์ (pure culture) เนื่องจากจุลินทรีย์ผสมสามารถใช้วัตถุดิบในการผลิตไฮโดรเจนได้หลากหลาย ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้มากกว่าจุลินทรีย์บริสุทธิ์ (Soares et al., 2020) อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์ผสมมักมีการปนเปื้อนของแบคทีเรียที่ไม่ต้องการ เช่น แบคทีเรียที่ใช้ไฮโดรเจน (hydrogen consuming bacteria) วิธีการกำจัดแบคทีเรียเหล่านี้ ทำได้โดยใช้สารเคมีและการใช้ความร้อน (Bari et al., 2022) กล้าเชื้อแบคทีเรียที่พบมากที่สุดในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนที่อุณหภูมิปานกลาง (mesophilic condition) ได้แก่ *Clostridium* spp. และ *Enterobacter* spp. ส่วนที่อุณหภูมิสูง (thermophilic condition) ได้แก่ *Thermoanaerobacterium* spp. และ *Thermotoga* spp. (Soares et al., 2020)

ระยะเวลากักเก็บ

ระยะเวลากักเก็บคือระยะเวลาเฉลี่ยที่วัตถุดิบอยู่ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ระยะเวลากักเก็บที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้อัตราการผลิตไฮโดรเจนสูง สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ผลิตมีเทน และลดการผลิตผลิตภัณฑ์จากการหมักที่ไม่ต้องการ โดยทั่วไป กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง จะควบคุมระยะเวลากักเก็บอยู่ระหว่าง ๖–๒๔ ชั่วโมง (Arun et al., 2022) หากระยะเวลากักเก็บสั้นเกินไป (ต่ำกว่า ๔ ชั่วโมง) อาจเกิดการชะออกจากระบบ (washout) ของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน ส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

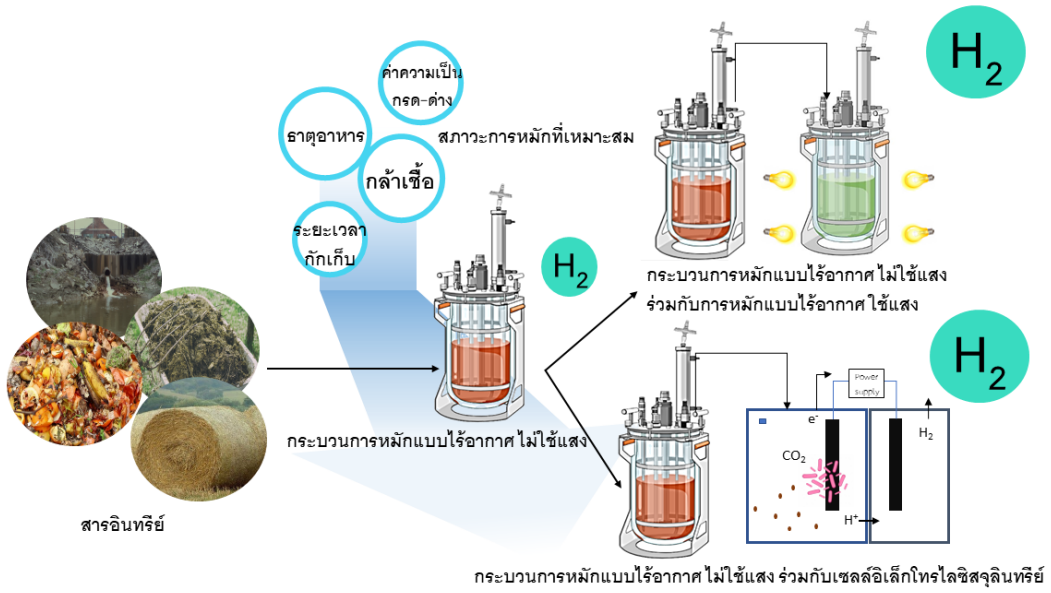
ข้อจำกัดในการใช้พลังงานไฮโดรเจน

ข้อจำกัดของการใช้พลังงานไฮโดรเจนที่ผลิตจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง คือปัญหาด้านการจัดเก็บและการขนส่ง เนื่องจากไฮโดรเจนสามารถระเบิดได้ ดังนั้น ในการจัดเก็บและการขนส่งผู้ที่เกี่ยวข้องจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ ถึงแม้ว่าการจัดเก็บไฮโดรเจนได้พัฒนาไปหลายรูปแบบในปัจจุบัน (Agyekum et al., 2022) เช่น การทำให้เป็นของเหลว (liquefaction) แก๊สอัด (compressed gaseous) และการเก็บในถังอัดเย็นยิ่งยวด (cryo-compressed tank) แต่เทคโนโลยีบางอย่างที่เกี่ยวข้องยังอยู่ในระหว่างการพัฒนา นอกจากนั้น การจัดการความปลอดภัยเกี่ยวกับการจัดเก็บและการขนส่งไฮโดรเจนยังไม่มีผู้ศึกษาอย่างครอบคลุม ทั้งนี้ การขนส่งไฮโดรเจนในปัจจุบันแบ่งออกเป็น ๓ ประเภท (Agyekum et al., 2022) ได้แก่ การขนส่งทางบก (rail or road transportation) การขนส่งทางทะเล (ocean transportation) และการขนส่งโดยใช้ระบบท่อ (transportation via pipelines)

บทสรุป

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง จัดเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการนำไปผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายชนิดในกระบวนการผลิต เช่น วัสดุลิกโนเซลลูโลสและวัสดุเหลือทิ้งอื่น ๆ การเพิ่มผลได้ไฮโดรเจนให้สูงขึ้นจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง สามารถทำได้โดยการผลิตไฮโดรเจนแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง ร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม การผลิตไฮโดรเจนที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีปัจจัยและภาวะที่เหมาะแก่กระบวนการผลิตไฮโดรเจน เช่น กล้าเชื้อ อุณหภูมิ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลากักเก็บ และธาตุอาหารหลักกับธาตุอาหารรอง (ภาพที่ ๑) ข้อจำกัดของการใช้พลังงานไฮโดรเจนคือการจัดเก็บและการขนส่งไฮโดรเจน ซึ่งต้องศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้การใช้พลังงานไฮโดรเจนเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย



ภาพที่ ๑ ภาพรวมการพัฒนากระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ไม่ใช้แสง

เอกสารอ้างอิง

Arun, J., Sasipraba, T., Gopinath, K.P., Priyadharsini, P., Nachiappan, S., Nirmala, N., Dawn, S.S., Chi, N.T.L. and Pugazhendhi, A. (2022) Influence of Biomass and Nano Additives in Dark Fermentation for Enriched Bio-hydrogen Production: A Detailed Mechanistic Review on Pathway and Commercialization Challenges. Fuel. 327, 125112.

Agyekum, E.B., Nutakor, C., Agwa, A.M. and Kamel, S. (2022) A Critical Review of Renewable Hydrogen Production Methods: Factors affecting Their Scale-up and Its Role in Future Energy Generation. Membranes. 12, 173.

Argun, H., Kargi, F., Kapdan, I. and Oztekin, R. (2008) Biohydrogen Production by Dark Fermentation of Wheat Powder Solution: Effects of C/N and C/P Ratio on Hydrogen Yield and Formation Rate. Int. J. Hydrog. Energy. 33(7), 1813–19.

Bari, H.E., Lahboubi, N., Habchi, S., Rachidi, S., Bayssi, O., Nabil, N., Mortezaei, Y. and Villa, R. (2022) Biohydrogen Production from Fermentation of Organic Waste, Storage and Applications. Cleaner Waste Syst. 2, 100043.

Cai, J., Zhao, Y., Fan, J., Li, F., Feng, C., Guan, Y, Wang, R. and Tang, N. (2019) Photosynthetic Bacteria Improved Hydrogen Yield of Combined Dark- and Photo-fermentation. J. Biotechnol. 302, 18–25.

Chen, Y., Yin, Y. and Wang, J. (2021) Recent Advance in Inhibition of Dark Fermentative Hydrogen Production. Int. J. Hydrog. Energy. 46(7), 5053–73.

Khongkliang, P., Jehlee, A., Kongjan, P., Reungsang, A. and O-Thong, S. (2019) High Efficient Biohydrogen Production from Palm Oil Mill Effluent by Two-stage Dark Fermentation and Microbial Electrolysis under Thermophilic Condition. Int. J. Hydrog. Energy. 44(60), 31841–52.

Kumari, S. and Das, D. (2017) Improvement of Biohydrogen Production using Acidogenic Culture. Int. J. Hydrog. Energy. 42(7), 4083–94.

Mahata, C., Ray, S. and Das, D. (2020) Optimization of Dark Fermentative Hydrogen Production from Organic Wastes using Acidogenic Mixed Consortia. Energy Convers. Manag. 219, 113047.

Miñón-Fuentes, R. and Aguilar-Juárez, O. (2019) Hydrogen Production from Coffee Pulp by Dark Fermentation. Water Sci. Technol. 80(9), 1692–701.

Rao, R. and Basak, N. (2022) Sequential Dark-photo Batch Fermentation and Kinetic Modelling for Biohydrogen Production using Cheese Whey as a Feedstock. Appl. Biochem. Biotechnol. 194, 3930–60.

Singh, T., Alhazmi, A., Akbar, M., Srivastava, N., Haque, S., Sharma, S., Singh, R., Yoon, T. and Gupta, V.K. (2021) Integrated Biohydrogen Production via Lignocellulosic Waste: Opportunity, Challenges & Future Prospects, Bioresour. Technol. 338, 125511.

Singh, V. and Das, D. (2019) Potential of Hydrogen Production from Biomass. In de Miranda PEV, Editor. Science and Engineering of Hydrogen-based Energy Technologies. Academic Press: Cambridge, MA. p. 123–64.

Soares, J.F., Confortin, T.C., Todero, I., Mayer, F.D. and Mazutti, M.A. (2020) Dark Fermentative Biohydrogen Production from Lignocellulosic Biomass: Technological Challenges and Future Prospects. Renew. Sustain. Energy Rev. 117, 109484.

Wang, J. and Yin, Y. (2021) *Clostridium* Species for Fermentative Hydrogen Production: An Overview. Int. J. Hydrog. Energy. 46(70), 34599–625.

Yin, Y., Song, W. and Wang, J. (2022) Inhibitory Effect of Acetic Acid on Dark-fermentative Hydrogen Production. Bioresour. Technol. 364, 128074.