ศักยภาพของโปรตีนเซลล์เดียวต่อสมรรถภาพทางกายและสุขภาพ ในบริบทวิทยาศาสตร์การกีฬา

สินีนุช โสพส[1], สุพรรษา ก้งเซ่ง[1] , พุทธจักร ช่วยราย[2] มณฑล เลิศคณาวนิชกุล[3*]

[1]คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตกระบี่

[2]โรงพยาบาลโรคผิวหนังเขตร้อนภาคใต้

[3]สาขาเทคนิคการแพทย์ สำนักวิชาสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทคัดย่อ

โปรตีนเซลล์เดียว (Single Cell Protein; SCP) เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ผลิตจากจุลินทรีย์ เช่น สาหร่าย ยีสต์ แบคทีเรีย และรา ซึ่งได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง มีองค์ประกอบของกรดอะมิโนจำเป็นที่ครบถ้วน และสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน งานทบทวนวรรณกรรมเชิงบรรยาย (narrative review) นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับบทบาทของ SCP ต่อสมรรถภาพทางกายและสุขภาพโดยรวมภายใต้บริบทของวิทยาศาสตร์การกีฬา โดยทำการสืบค้นข้อมูลจากฐานข้อมูลวิชาการที่สำคัญ ได้แก่ PubMed, Scopus และ Google Scholar ครอบคลุมผลงานวิจัยที่เผยแพร่ระหว่างปี ค.ศ. 2000–2024

ผลการวิเคราะห์จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่า ประเด็นสำคัญ (key findings) ของงานวิจัยที่ผ่านมา คือ SCP มีศักยภาพในการเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนโปรตีนจากสัตว์สำหรับนักกีฬาและบุคคลทั่วไป โดยสามารถสนับสนุนการสังเคราะห์โปรตีนของกล้ามเนื้อ เพิ่มความทนทานของร่างกาย และช่วยเสริมการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน นอกจากนี้ SCP ยังมีสารออกฤทธิ์ชีวภาพหลายชนิด เช่น เปปไทด์ต้านอนุมูลอิสระ วิตามินบี และโพลีแซ็กคาไรด์ ซึ่งอาจมีบทบาทในการลดความเครียดออกซิเดชันและการอักเสบที่เกิดขึ้นหลังการออกกำลังกาย อย่างไรก็ตาม การนำ SCP ไปประยุกต์ใช้ในด้านโภชนาการการกีฬายังคงมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ประเด็นด้านความปลอดภัย ความสามารถในการย่อยและการดูดซึม รวมถึงการยอมรับของผู้บริโภค

โดยสรุป SCP ถือเป็นแหล่งสารอาหารที่มีศักยภาพสูงและมีแนวโน้มที่จะมีบทบาทสำคัญในอนาคตของโภชนาการการกีฬา อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเชิงคลินิกเพิ่มเติมเพื่อยืนยันประสิทธิผลและความปลอดภัยของการบริโภค SCP ในระยะยาว

คำสำคัญ: โปรตีนเซลล์เดียว, สมรรถภาพทางกาย, โภชนาการการกีฬา, โปรตีนทางเลือก, สุขภาพ

Corresponding author: มณฑล เลิศคณาวนิชกุล สำนักวิชาสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ประเทศไทย

Email: Lmonthon55@gmail.com

The Potential of Single-Cell Protein for Enhancing Physical Performance and Health: A Sports Science Perspective

Sineenuch sorot[1], Supunsa Kongseng[1], Buddhajak Chuayray[2] Monthon Lertcanawanichakul[3*]

[1]Faculty of Sports and Health Sciences, Thailand National Sports University, Krabi Campus

Southern Regional Hospital of Tropical Dermatology

[3]Department of Medical Technology, School of Allied Health Sciences, Walailak University

---

Abstract

Single Cell Protein (SCP) is an alternative protein source produced from microorganisms such as algae, yeast, bacteria, and fungi. In recent decades, SCP has received increasing attention due to its high protein content, balanced essential amino acid profile, and its potential for sustainable and environmentally friendly production. This narrative review aims to compile and analyze existing knowledge regarding the role of SCP in physical performance and overall health within the context of sports science. Relevant literature was retrieved from major academic databases, including PubMed, Scopus, and Google Scholar, covering studies published between 2000 and 2024.

The analysis of the reviewed literature indicates several key findings. SCP shows strong potential as an alternative protein source to replace animal-based proteins for both athletes and the general population. It may support muscle protein synthesis, improve physical endurance, and enhance immune function. In addition, SCP contains various bioactive compounds such as antioxidant peptides, B vitamins, and polysaccharides, which may help reduce oxidative stress and inflammation following exercise. However, the application of SCP in sports nutrition still faces several limitations, including concerns related to safety, digestibility and bioavailability, as well as consumer acceptance.

In conclusion, SCP represents a promising and sustainable nutritional resource with potential applications in the future of sports nutrition. Nevertheless, further clinical studies are required to confirm its effectiveness and long-term safety for human consumption.

Corresponding author: Monthon Lertcanawanichakul, School of Allied Health Sciences, Walailak University, Thailand, Email: Lmonthon55@gmail.com

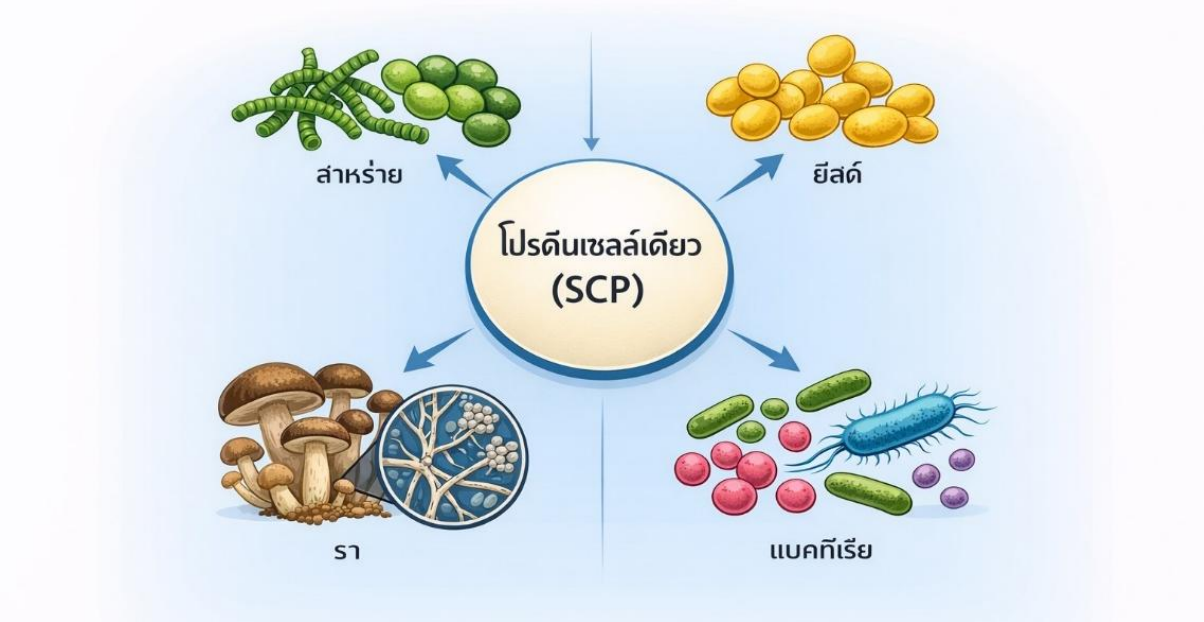
บทนำ

ความต้องการโปรตีนทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการเติบโตของประชากรและกระแสนิยมด้านสุขภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มนักกีฬาและบุคคลที่ออกกำลังกายเป็นประจำ ซึ่งต้องการโปรตีนคุณภาพสูงเพื่อซ่อมแซมกล้ามเนื้อและเพิ่มสมรรถภาพทางกาย (Phillips & Van Loon, 2011) อย่างไรก็ตามแหล่งโปรตีนแบบดั้งเดิม เช่น เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์นม มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรธรรมชาติ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และ ต้นทุนการผลิต (FAO, 2013) ส่งผลให้เกิดการค้นคว้าแหล่งโปรตีน ทางเลือกใหม่ ที่มีความยั่งยืน

โปรตีนเซลล์เดียว (Single Cell Protein; SCP) หมายถึง ชีวมวลจุลินทรีย์ที่มีปริมาณโปรตีนสูง ซึ่งสามารถผลิตได้จากสาหร่าย ยีสต์ รา และแบคทีเรีย โดยมีปริมาณโปรตีนตั้งแต่ 50–80% ของน้ำหนักแห้ง (Anupama & Ravindra, 2000) นอกจากนี้ SCP ยังมีข้อดีด้านประสิทธิภาพการผลิต เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้รวดเร็ว ใช้พื้นที่น้อย และใช้วัตถุดิบเหลือทิ้งเป็นแหล่งคาร์บอนได้ (Matassa et al., 2016)

ในบริบทของวิทยาศาสตร์การกีฬา โปรตีนมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มมวลกล้ามเนื้อ การฟื้นตัวและความทนทานของร่างกาย (Tipton & Wolfe, 2004) ดังนั้น SCP จึงได้รับความสนใจในฐานะแหล่งโปรตีนใหม่สำหรับนักกีฬาและบุคคลทั่วไป

เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมของแหล่งผลิต SCP ก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์เชิงลึก



ภาพที่ 1 แหล่งจุลินทรีย์ที่ใช้ผลิตโปรตีนเซลล์เดียว
ที่มา: ดัดแปลงจาก Ritala et al. (2017)

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้าจะรายงานถึงคุณค่าทางโภชนาการและศักยภาพของโปรตีนเซลล์เดียวในฐานะแหล่ง โปรตีนทางเลือกที่ยั่งยืน แต่หลักฐานเชิงประจักษ์ เกี่ยวกับผลกระทบต่อสมรรถภาพทางกาย ในบริบทวิทยาศาสตร์การกีฬายังคงมีจำกัด โดยเฉพาะข้อมูลเชิงสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการฟื้นตัวของกล้ามเนื้อ ความทนทานต่อการออกกำลังกาย และการเผาผลาญพลังงาน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพทางกายของนักกีฬา ช่องว่างทางองค์ความรู้นี้สะท้อนถึงความจำเป็น ในการศึกษาที่มุ่งเน้นการประเมินผลของโปรตีนเซลล์เดียวต่อสมรรถภาพทางกายอย่างเป็นระบบและใช้ตัวชี้วัดทางวิทยาศาสตร์การกีฬาที่มีความแม่นยำ เพื่อสร้างหลักฐานเชิงประจักษ์สำหรับการประยุกต์ใช้ ในระดับคลินิก และอุตสาหกรรมโภชนาการการกีฬา

ช่องว่างดังกล่าวมีความสำคัญเชิงวิชาการ เนื่องจากการตอบสนองของร่างกายต่อโปรตีนไม่ได้ขึ้นกับปริมาณโปรตีนเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับอัตราการดูดซึม การกระจายตัวของกรดอะมิโน และการควบคุมสัญญาณระดับเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกล้ามเนื้อและการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ (Phillips & Van Loon, 2011) ดังนั้นการศึกษาที่บูรณาการข้อมูลทางชีวเคมี โภชนาการ และสรีรวิทยาการออกกำลังกายจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจบทบาทของ SCP อย่างแท้จริงในบริบทวิทยาศาสตร์การกีฬา

ความสำคัญเชิงวิชาการและความแตกต่างจากงานที่ผ่านมา

แม้จะมีงานทบทวนเกี่ยวกับโปรตีนเซลล์เดียวจำนวนหนึ่งในบริบทอาหารและความยั่งยืนแต่การสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบชีวเคมีของ SCP กับกลไกสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับสมรรถภาพทางกายในบริบทวิทยาศาสตร์การกีฬายังมีจำกัด งานทบทวนนี้จึงมีความแตกต่างจากงานก่อนหน้า โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์แบบบูรณาการ ตั้งแต่ระดับโมเลกุล จนถึงระดับสมรรถภาพร่างกายซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ในสาขาโภชนาการการกีฬาเชิงจุลชีววิทยา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. วิเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับ SCP ต่อสมรรถภาพทางกาย
2. ประเมินศักยภาพ SCP ในโภชนาการการกีฬา
3. สังเคราะห์ข้อดี ข้อจำกัด และแนวโน้มอนาคต

สมมติฐานการวิจัย

โปรตีนเซลล์เดียวมีคุณสมบัติทางโภชนาการและชีวเคมีที่สามารถสนับสนุนสมรรถภาพทางกายและสุขภาพ ได้ในระดับเทียบเท่าหรือดีกว่าโปรตีนแบบดั้งเดิม

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมเชิงบรรยาย (Narrative review) โดยรวบรวมข้อมูลจากฐานข้อมูลวิชาการหลัก ได้แก่ PubMed, Scopus และ ScienceDirect โดยใช้คำค้น “single cell protein”, “microbial protein”, “sports nutrition” และ “exercise performance” ครอบคลุมช่วงปี 2000–2024

งานวิจัยที่คัดเลือก ต้องผ่านการ peer review และมีข้อมูลเชิงโภชนาการหรือ ชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับสมรรถภาพทางกาย

การเลือกตัวแปรที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงจากหลักสรีรวิทยาการออกกำลังกายและโภชนาการการกีฬาซึ่งระบุว่าตัวชี้วัดด้านความทนทานของกล้ามเนื้อ ความสามารถในการฟื้นตัวและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เป็นตัวบ่งชี้ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงจากการบริโภคโปรตีน การกำหนดระยะเวลาการทดลองและเงื่อนไขการควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนถูกออกแบบให้สอดคล้องกับแนวทางมาตรฐานงานวิจัยทางโภชนาการ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนผลของโปรตีนเซลล์เดียวโดยตรง และลดอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกให้น้อยที่สุดเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการสังเคราะห์ข้อมูล งานวิจัยที่ผ่านการคัดเลือกถูกประเมินคุณภาพโดยพิจารณาจาก ระดับหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ ความสอดคล้องของวิธีการทดลอง และความน่าเชื่อถือของตัวชี้วัดผลลัพธ์ เช่น muscle protein synthesis rate, nitrogen balance และ exercise tolerance ซึ่งเป็นตัวแปรมาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัยโภชนาการการกีฬา การวิเคราะห์เชิงวิพากษ์ดังกล่าว ช่วยลดอคติจากการตีความข้อมูลและเพิ่มความแข็งแรง ของข้อสรุปเชิงวิชาการ

ความน่าเชื่อถือของการคัดเลือกข้อมูล

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของการสังเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยคัดเลือกเฉพาะบทความที่ผ่านการ peer review และรายงานข้อมูลเชิงปริมาณหรือเชิงกลไกที่ตรวจสอบได้ รวมถึงเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการศึกษาหลายฉบับเพื่อลดอคติจากงานวิจัยเดี่ยว แนวทางดังกล่าวช่วยให้การตีความ มีความเป็นกลางและสะท้อนภาพรวมของหลักฐานเชิงวิทยาศาสตร์ในปัจจุบัน

ผลการวิจัย

กรอบการตีความผล

ก่อนการนำเสนอผลการสังเคราะห์ข้อมูล จำเป็นต้องกำหนดกรอบแนวคิดการตีความเพื่อเชื่อมโยงองค์ประกอบทางโภชนาการกับผลลัพธ์ทางสรีรวิทยา โดยกรอบการวิเคราะห์ในงานนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าคุณภาพโปรตีนและองค์ประกอบกรดอะมิโนเป็นตัวแปรหลักที่กำหนดประสิทธิภาพของสารอาหารต่อสมรรถภาพทางกายดังนั้นการวิเคราะห์ผลจึงเน้นความสัมพันธ์เชิงกลไกระหว่างองค์ประกอบโมเลกุลกับการตอบสนองทางสรีรวิทยา

1. องค์ประกอบทางโภชนาการของโปรตีนเซลล์เดียว

เพื่อประเมินศักยภาพของโปรตีนเซลล์เดียวในฐานะแหล่งสารอาหารสำหรับสมรรถภาพทางกาย จำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบทางโภชนาการพื้นฐานเป็นลำดับแรก เนื่องจากปริมาณโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตมีผลโดยตรงต่อการเผาผลาญพลังงาน การสร้างกล้ามเนื้อ และการฟื้นตัวหลังออกกำลังกาย (Phillips & Van Loon, 2011) การเปรียบเทียบองค์ประกอบจากจุลินทรีย์แต่ละชนิด จึงช่วยให้เห็นความแตกต่างเชิงชีวเคมีที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพทางสรีรวิทยา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางโภชนาการของโปรตีนเซลล์เดียว

แหล่ง	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)	แหล่งอ้างอิง
สาหร่ายสไปรูลินา	60–70	5–7	15–20	Becker (2007)
ยีสต์	45–55	6–8	30	Nasseri et al. (2011)
แบคทีเรีย	60–80	5	10	Matassa et al. (2016)
รา	50–60	10	20	Ritala et al. (2017)

จากตารางพบว่า SCP จากแบคทีเรียมีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด ขณะที่ยีสต์มีคาร์โบไฮเดรตสูงกว่า ซึ่งอาจส่งผลต่อการเลือกใช้ในสูตรโภชนาการกีฬาเฉพาะประเภท เช่น endurance vs strength

2. โปรไฟล์กรดอะมิโนและคุณภาพโปรตีน

แม้ว่าปริมาณโปรตีนรวมจะเป็นตัวชี้วัดเบื้องต้น แต่คุณภาพโปรตีนถูกกำหนดโดยองค์ประกอบกรดอะมิโนจำเป็น ซึ่งมีบทบาทต่อการกระตุ้นการสังเคราะห์โปรตีนในกล้ามเนื้อ (muscle protein synthesis) โดยเฉพาะ leucine ที่มีบทบาทเป็น metabolic signal (Phillips, 2014) ดังนั้น การวิเคราะห์โปรไฟล์กรดอะมิโนของ SCP จึงมีความสำคัญต่อการประเมินศักยภาพเชิงสรีรวิทยา

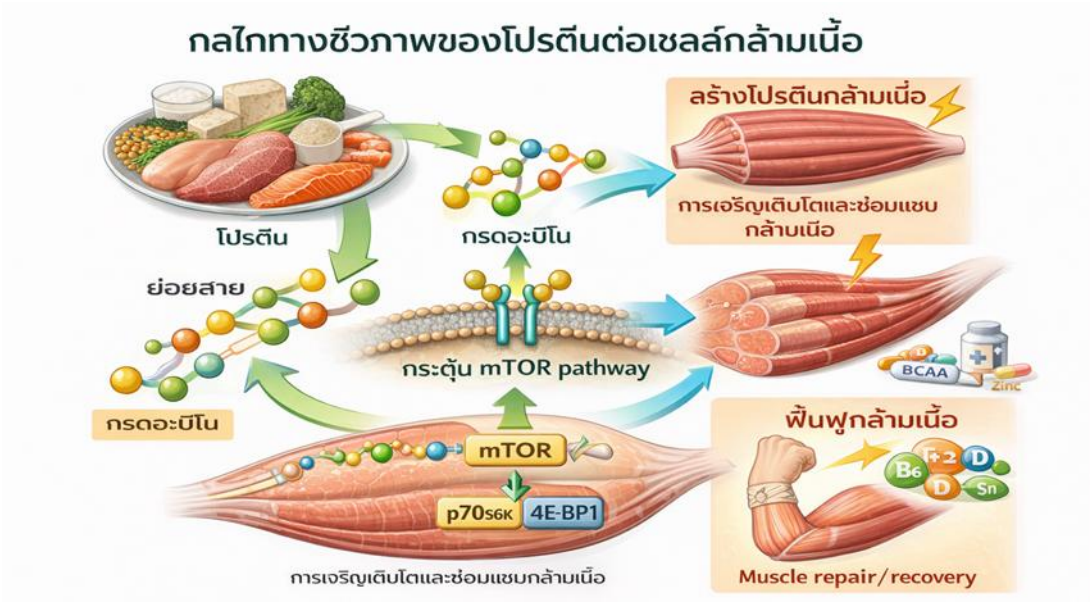
งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า SCP มีสัดส่วน branched-chain amino acids สูงใกล้เคียงโปรตีนจากสัตว์ ซึ่งสนับสนุนสมมติฐานว่า SCP อาจใช้ทดแทนโปรตีนคุณภาพสูงในนักกีฬาได้

3. กลไกทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับสมรรถภาพ

เพื่อทำความเข้าใจว่าทำไมโปรตีนเซลล์เดียว (Single Cell Protein; SCP) จึงอาจส่งผลต่อสมรรถภาพ จำเป็นต้องพิจารณากลไกระดับเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อโปรตีน โดยเฉพาะ signaling pathways ที่ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนและการฟื้นตัวของกล้ามเนื้อ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพของสารอาหารต่อระบบร่างกาย

จากหลักฐานทางชีวโมเลกุลพบว่า leucine สามารถกระตุ้น mTOR pathway ซึ่งเป็นกลไกหลักในการกระตุ้นการสร้างกล้ามเนื้อและซ่อมแซมเนื้อเยื่อ (Tipton & Wolfe, 2004) ดังนั้น SCP ซึ่งมีองค์ประกอบกรดอะมิโนจำเป็น อาจมีศักยภาพในการกระตุ้นกลไกดังกล่าว ในลักษณะเดียวกับแหล่ง โปรตีนคุณภาพสูง โดยกลไกระดับโมเลกุลของกระบวนการนี้สรุปไว้ใน **ภาพที่ 2**

นอกจากกลไก mTOR แล้ว หลักฐานล่าสุดยังชี้ให้เห็นว่าโปรตีนและกรดอะมิโนบางชนิด สามารถมีผลต่อ mitochondrial biogenesis และการทำงานของระบบพลังงานระดับเซลล์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมรรถภาพความทนทานของนักกีฬา ความสัมพันธ์ดังกล่าวบ่งชี้ว่า SCP อาจมีบทบาทมากกว่าการเป็นเพียงแหล่งโปรตีน แต่เป็นสารอาหารเชิงหน้าที่ที่สามารถปรับสภาพการเผาผลาญพลังงานของร่างกายได้ในระดับระบบ (systemic metabolic modulation)



ภาพที่ 2 กลไกทางชีวภาพของโปรตีนต่อเซลล์กล้ามเนื้อ

ที่มา: ดัดแปลงจากงานด้านชีวเคมีโภชนาการ (Phillips, 2014)

4. การเปรียบเทียบคุณภาพกับโปรตีนชนิดอื่น

เหตุผลในการเปรียบเทียบกับโปรตีนมาตรฐาน

แม้ SCP จะมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่โดดเด่น แต่การประเมินศักยภาพเชิงปฏิบัติจำเป็นต้องเปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนมาตรฐานที่ใช้จริงในโภชนาการการกีฬา เช่น เวย์โปรตีนหรือโปรตีนพืช เนื่องจากค่าดัชนีคุณภาพ โปรตีนและการย่อยได้เป็นตัวชี้วัดสำคัญที่ใช้ในการตัดสินประสิทธิภาพ ของแหล่งโปรตีนในเชิงสรีรวิทยา การเปรียบเทียบดังกล่าวจึงช่วยให้สามารถประเมินศักยภาพของ SCP ได้อย่างเป็นรูปธรรม และมีความหมายทางคลินิก

แม้ว่าข้อมูลองค์ประกอบทางโภชนาการและโปรไฟล์กรดอะมิโนของโปรตีนเซลล์เดียวจะบ่งชี้ถึงศักยภาพเชิงชีวเคมีที่โดดเด่น แต่การประเมินคุณค่าทางโภชนาการของโปรตีน สำหรับการประยุกต์ใช้จริงในบริบท วิทยาศาสตร์การกีฬาจำเป็นต้องอาศัยการเปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนมาตรฐานที่ใช้จริงในโภชนาการการกีฬา เนื่องจากค่าทางทฤษฎีเพียงอย่างเดียวไม่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพทางสรีรวิทยาได้อย่างครบถ้วน (Phillips & Van Loon, 2011)

ในทางปฏิบัติ การประเมินคุณภาพโปรตีนในระดับสากลนิยมใช้ตัวชี้วัดเชิงดัชนี เช่น Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (PDCAAS) และค่าการย่อยได้ ซึ่งสะท้อนทั้งความสมบูรณ์ของกรดอะมิโนและความสามารถของร่างกายในการนำไปใช้จริง ตัวชี้วัดเหล่านี้ มีความสำคัญอย่างยิ่งในโภชนาการการกีฬา เนื่องจากอัตราการดูดซึมและการใช้ประโยชน์ของโปรตีนมีผลโดยตรงต่อการ สังเคราะห์โปรตีนกล้ามเนื้อและการฟื้นตัวหลังการออกกำลังกาย (Tipton & Wolfe, 2004)

เพื่อให้เห็นภาพเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบ **ตารางที่ 2** แสดงค่าคุณภาพโปรตีนของ SCP เทียบกับแหล่งโปรตีนที่ใช้เป็นมาตรฐานในโภชนาการการกีฬา ได้แก่ เวย์โปรตีนและโปรตีนจากพืช

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณภาพโปรตีน

แหล่งโปรตีน	PDCAAS	การย่อยได้	ความยั่งยืน	อ้างอิง
เวย์	1.00	สูง	ต่ำ	FAO (2013)
ถั่วเหลือง	0.91	ปานกลาง	สูง	Young & Pellett (1994)
SCP	0.90–1.00	สูง	สูงมาก	Matassa et al. (2016)

ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า SCP มีค่าคุณภาพโปรตีนใกล้เคียงเวย์โปรตีน ซึ่งถือเป็น gold standard ของโปรตีนในโภชนาการการกีฬา และมีค่าที่สูงกว่าโปรตีนพืชหลายชนิด ข้อมูลดังกล่าว มีนัยสำคัญต่อการตีความเชิงสรีรวิทยา เนื่องจากชี้ให้เห็นว่า SCP ไม่ได้เป็นเพียงแหล่งโปรตีนทางเลือกในเชิงสิ่งแวดล้อมเท่านั้น แต่ยังมีศักยภาพเชิงหน้าที่ทางชีวภาพที่สามารถสนับสนุน performance adaptation ได้จริง (Matassa et al., 2016)นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลในหัวข้อก่อนหน้าซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบกรดอะมิโน และกลไกการกระตุ้น anabolic signaling จะเห็นได้ว่าคุณภาพของ SCP ในเชิงชีวภาพมีความสอดคล้องกับกลไกระดับโมเลกุล ซึ่งเป็นหลักฐานสนับสนุนเชิงบูรณาการว่าศักยภาพของ SCP ไม่ได้เกิดจากค่าดัชนีทางโภชนาการเพียงอย่างเดียว แต่สะท้อนถึงความสามารถในการตอบสนองต่อระบบสรีรวิทยาของร่างกายอย่างแท้จริง

5. ผลต่อสุขภาพและการฟื้นตัวหลังออกกำลังกาย

นอกจากบทบาทด้านกล้ามเนื้อแล้ว สารชีวโมเลกุลที่พบใน SCP ยังอาจส่งผลต่อระบบอื่นของร่างกาย เช่น ระบบภูมิคุ้มกันและระบบต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการฟื้นตัวของนักกีฬา การลด oxidative stress สามารถลดความเสียหายของเซลล์และเพิ่มประสิทธิภาพการฝึกซ้อม (Ritala et al., 2017)

เมื่อพิจารณาในมุมมองสรีรวิทยาการออกกำลังกาย การลด oxidative stress และการควบคุมการอักเสบ หลังการออกกำลังกายมีความสำคัญต่อการคงประสิทธิภาพการฝึกซ้อมในระยะยาว เนื่องจากความเสียหายระดับเซลล์สะสมอาจนำไปสู่ภาวะ overtraining และลดความสามารถในการฟื้นตัว หลักฐานเชิงชีวเคมีจากการศึกษาจุลินทรีย์ที่ใช้ผลิต SCP ระบุว่ามีสารออกฤทธิ์ชีวภาพหลายชนิด เช่น เปปไทด์ต้านอนุมูลอิสระและโพลีแซ็กคาไรด์เชิงหน้าที่ ซึ่งอาจมีบทบาทในการปกป้องเซลล์กล้ามเนื้อจากความเสียหายที่เกิดจากการออกกำลังกายหนัก

การสรุปและอภิปรายผล

ผลการทบทวนวรรณกรรมแสดงให้เห็นอย่างสอดคล้องกันว่าโปรตีนเซลล์เดียวเป็นแหล่งโปรตีนที่มีศักยภาพสูงทั้งในด้านโภชนาการและสมรรถภาพทางกาย โดยเฉพาะในแง่ขององค์ประกอบกรดอะมิโนจำเป็นและค่าการย่อยได้ ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพทางสรีรวิทยาของโปรตีน (Phillips & Van Loon, 2011) ความสามารถของ SCP ในการกระตุ้น mTOR signaling pathway ผ่าน leucine ถือเป็นกลไกสำคัญที่สนับสนุนบทบาทด้านการสร้างกล้ามเนื้อ

เมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบ SCP มีคุณภาพโปรตีนใกล้เคียงเวย์โปรตีนซึ่งเป็น gold standard ของโปรตีนกีฬา แสดงให้เห็นว่า SCP ไม่ได้เป็นเพียงโปรตีนทางเลือกเชิงสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีศักยภาพเชิงสรีรวิทยาอย่างแท้จริง (Matassa et al., 2016)

อย่างไรก็ตาม แม้หลักฐานเชิงชีวเคมีและ *in vitro* จะสนับสนุนศักยภาพของ SCP อย่างชัดเจนแต่ข้อจำกัดสำคัญยังคงอยู่ในระดับ clinical evidence เนื่องจากจำนวนการศึกษาในมนุษย์ยังมีจำกัดซึ่งทำให้ยังไม่สามารถสรุปผลเชิงประสิทธิผลต่อสมรรถภาพทางกายได้อย่างแน่ชัด

อีกประเด็นสำคัญคือมิติด้านความยั่งยืน ซึ่ง SCP มีข้อได้เปรียบเหนือโปรตีนจากสัตว์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากใช้ทรัพยากรต่ำกว่าและปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่า (FAO, 2013) ประเด็นนี้สอดคล้องกับแนวโน้ม global nutrition transition ที่มุ่งสู่แหล่งอาหารยั่งยืน

อย่างไรก็ตาม การนำ SCP ไปใช้จริงยังต้องพิจารณาปัจจัยด้านการยอมรับของผู้บริโภค ความปลอดภัยระยะยาว และมาตรฐานกฎหมายอาหาร ซึ่งถือเป็นตัวแปรสำคัญต่อการพัฒนาเชิงพาณิชย์ (Nasseri et al., 2011)

โดยสรุป SCP เป็นแหล่งโปรตีนที่มีศักยภาพสูงทั้งเชิงโภชนาการ สมรรถภาพ และความยั่งยืน แต่จำเป็นต้องมีการวิจัยเชิงคลินิกเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลในมนุษย์

การตีความเชิงสรีรวิทยาและนัยสำคัญเชิงวิทยาศาสตร์การกีฬา

เมื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยบูรณาการข้อมูลจากทุกส่วน จะเห็นได้ว่าศักยภาพของโปรตีนเซลล์เดียว ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงระดับองค์ประกอบทางโภชนาการ แต่ขยายไปถึงระดับการตอบสนองทางสรีรวิทยาและชีวเคมีของร่างกาย ซึ่งเป็นมิติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในวิทยาศาสตร์การกีฬา เนื่องจากสมรรถภาพทางกายเป็นผลรวมของกระบวนการทางชีววิทยาหลายระบบที่ทำงานร่วมกัน เช่น ระบบพลังงาน ระบบกล้ามเนื้อ และระบบภูมิคุ้มกัน

ในเชิงกลไก การมีกรดอะมิโนจำเป็นครบถ้วนและค่าการย่อยได้สูงของ SCP บ่งชี้ถึงศักยภาพในการสนับสนุน anabolic response ภายหลังการออกกำลังกาย ซึ่งเป็นช่วงเวลาสำคัญของการสร้างกล้ามเนื้อ (Tipton & Wolfe, 2004) ขณะเดียวกันองค์ประกอบชีวโมเลกุลรอง เช่น วิตามินและสารต้านอนุมูลอิสระ อาจมีบทบาทสนับสนุน recovery efficiency ซึ่งเป็นตัวกำหนดความสามารถในการฝึกซ้อมต่อเนื่องของนักกีฬา

ความแตกต่างจากงานทบทวนก่อนหน้า

ความโดดเด่นของบทความนี้เมื่อเทียบกับงานทบทวนที่ผ่านมาอยู่ที่การวิเคราะห์ SCP ภายใต้กรอบแนวคิดของวิทยาศาสตร์การกีฬาโดยเฉพาะ ไม่ใช่เพียงมิติอาหารหรือสิ่งแวดล้อม ซึ่งช่วยให้สามารถตีความข้อมูลเชิงโภชนาการในบริบทของ physiological performance ได้โดยตรง แนวทางดังกล่าวช่วยลดช่องว่างระหว่างงานวิจัยพื้นฐานด้านจุลชีววิทยาอาหารกับการประยุกต์ใช้จริงในวงการกีฬา

ช่องว่างทางการวิจัย ข้อจำกัด และมุมมองในอนาคต

ช่องว่างองค์ความรู้ที่สำคัญ (Key Research Gaps)

แม้โปรตีนเซลล์เดียว (Single-Cell Protein; SCP) จะได้รับการยอมรับว่าเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีศักยภาพสูงทั้งด้านโภชนาการ ความยั่งยืน และความสามารถในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม แต่หลักฐานเชิงประจักษ์ในบริบทของวิทยาศาสตร์การกีฬายังคงมีจำกัดและอยู่ในระยะเริ่มต้น โดยช่องว่างองค์ความรู้ที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้ ประการแรก ยังขาดการศึกษาประเภท randomized controlled trials (RCTs) ในกลุ่มนักกีฬาที่สามารถประเมินผลต่อสมรรถภาพทางกายได้โดยตรง ซึ่งทำให้การสรุปผลเชิงสาเหตุยังคงมีข้อจำกัด ประการที่สอง ข้อมูลด้าน pharmacokinetics และ bioavailability ของกรดอะมิโนจาก SCP ยังมีไม่เพียงพอ โดยเฉพาะข้อมูล ที่เปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนมาตรฐาน เช่น whey หรือ soy protein ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินประสิทธิภาพเชิงสรีรวิทยา ประการที่สาม หลักฐานเกี่ยวกับผลกระทบระยะยาวต่อระบบเมตาบอลิซึมยังมีจำกัด ทั้งในด้านการควบคุมสมดุลไนโตรเจน การตอบสนองของอินซูลิน และการปรับตัวของไมโครไบโอมในลำไส้ และประการสุดท้าย ความแตกต่างของการตอบสนองระหว่างชนิดกีฬา เช่น endurance, strength, และ intermittent sports ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างเป็นระบบ ช่องว่างเหล่านี้สะท้อนว่าการวิจัย SCP ในบริบทกีฬาอยู่ในช่วงระยะเริ่มต้นของการพัฒนาองค์ความรู้ และยังมีพื้นที่สำหรับการศึกษาต่อยอด ทั้งในระดับกลไกและระดับคลินิกอีกเป็นจำนวนมาก

ข้อจำกัดของงานทบทวนนี้ (Limitations of This Review)

แม้ว่างานทบทวนนี้จะมุ่งเน้นการสังเคราะห์องค์ความรู้เชิงบูรณาการจากหลักฐานที่มีอยู่ในปัจจุบัน แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาเมื่อแปลผลเชิงวิชาการ ประการแรก การทบทวนนี้เป็น narrative review ซึ่งไม่ได้ใช้ระเบียบวิธี systematic search และ meta-analysis จึงอาจมีความเสี่ยงต่อ selection bias ในการเลือกงานวิจัย ประการที่สอง จำนวนงานวิจัยเชิงคลินิกที่ศึกษา SCP ในมนุษย์ โดยเฉพาะในนักกีฬายังมีจำกัด ทำให้ระดับความเชื่อมั่นของข้อสรุปบางประเด็นยังไม่สูงเท่าที่ควร ประการที่สาม ความแตกต่างของสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่ใช้ผลิต SCP รวมถึงความแตกต่างของกระบวนการผลิต

อาจทำให้คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ทางชีวภาพแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลต่อความสามารถในการเปรียบเทียบข้ามงานวิจัย และประการสุดท้าย หลักฐานจำนวนหนึ่งยังคงอยู่ในระดับ *in vitro* หรือ animal model ซึ่งแม้จะให้ข้อมูลเชิงกลไกที่สำคัญ แต่ยังไม่สามารถสรุปผลเชิงคลินิกในมนุษย์ได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม แม้จะมีข้อจำกัดดังกล่าว การวิเคราะห์เชิงสังเคราะห์ในงานนี้ยังคงมีคุณค่าในการนำเสนอภาพรวมขององค์ความรู้ปัจจุบัน และช่วยกำหนดทิศทางการวิจัยในอนาคตได้อย่างมีนัยสำคัญ

มุมมองอนาคตเชิงนวัตกรรม (Future Perspectives)

ในอนาคต แนวโน้มการพัฒนา SCP อาจก้าวไปสู่แนวคิด “precision protein nutrition” ซึ่งเป็นการออกแบบสูตรโปรตีนเฉพาะบุคคลโดยอาศัยข้อมูลทางพันธุกรรม ระดับกิจกรรมทางกาย สถานะเมตาบอลิซึม และเป้าหมายการฝึกซ้อมของแต่ละบุคคล แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับทิศทางของ personalized sports nutrition ที่กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในระดับสากล โดยเฉพาะในยุคที่เทคโนโลยี omics และ digital health สามารถนำมาใช้ร่วมกันเพื่อปรับโภชนาการให้เหมาะสมกับลักษณะทางชีววิทยาเฉพาะบุคคล ได้ นอกจากนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีชีวกระบวนการและการคัดเลือกสายพันธุ์ จุลินทรีย์ขั้นสูงยังอาจช่วยเพิ่มคุณภาพกรดอะมิโน ปรับปรุงการย่อยได้ และเพิ่มสารออกฤทธิ์ชีวภาพใน SCP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการวิจัยต่อเนื่องทั้งในระดับพื้นฐานและระดับคลินิก SCP มีศักยภาพที่จะกลายเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของโภชนาการการกีฬายุคใหม่ที่ผสานทั้งประสิทธิภาพ สุขภาพ และความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน

สรุป (Conclusion)

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโปรตีนเซลล์เดียว (Single Cell Protein; SCP) เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีศักยภาพสูงทั้งในด้านโภชนาการและการส่งเสริมสมรรถภาพทางกาย โดยมีปริมาณโปรตีนสูงและมีกรดอะมิโนจำเป็นในสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการสร้างและซ่อมแซมกล้ามเนื้อหลังการออกกำลังกาย นอกจากนี้ SCP ยังมีสารออกฤทธิ์ชีวภาพหลายชนิด เช่น เปปไทด์ต้านอนุมูลอิสระ วิตามิน และสารชีวโมเลกุลอื่น ๆ ที่อาจช่วยลดความเครียดออกซิเดชันและสนับสนุนการฟื้นตัวของร่างกายหลังการออกกำลังกายได้

แม้ว่าหลักฐานจากการศึกษาในระดับชีวเคมีและการทดลองในห้องปฏิบัติการจะสนับสนุนศักยภาพของ SCP อย่างชัดเจน แต่การศึกษาที่ทดสอบผลในมนุษย์ โดยเฉพาะในกลุ่มนักกีฬา ยังมีจำนวนจำกัด ทำให้ยังไม่สามารถสรุปผลต่อสมรรถภาพทางกายได้อย่างชัดเจนในเชิงปฏิบัติ นอกจากนี้ ความแตกต่างของชนิดจุลินทรีย์และกระบวนการผลิต SCP อาจส่งผลต่อองค์ประกอบทางโภชนาการและฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

โดยสรุป SCP มีแนวโน้มที่จะเป็นแหล่งโปรตีนที่มีบทบาทสำคัญในโภชนาการการกีฬาในอนาคต เนื่องจากมีทั้งคุณค่าทางโภชนาการ ศักยภาพในการส่งเสริมสุขภาพ และความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม โดยเฉพาะการทดลองในมนุษย์ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพและความปลอดภัยของการใช้ SCP ในบริบทของนักกีฬาและผู้ที่ออกกำลังกายอย่างสม่ำเสมอ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ศึกษาประสิทธิผล SCP ในนักกีฬาจริง
2. วิเคราะห์ความปลอดภัยระยะยาว
3. พัฒนา formulation สำหรับกีฬาเฉพาะชนิด
4. ศึกษาการดูดซึมระดับ molecular kinetics

บรรณานุกรม

Anupama, & Ravindra, P. (2000). Value-added food: Single cell protein. *Biotechnology Advances*, 18, 459-479.

Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25, 207-210.

FAO. (2013). *Edible insects: future prospects for food and feed security.* Rome.

Matassa, S., Boon, N., Pikaar, I., & Verstraete, W. (2016). Microbial protein: future sustainable food supply. *Environmental Science & Technology*, 50, 8464-8476.

Morton, R. W., Murphy, K. T., McKellar, S. R., et al. (2018). Protein supplementation and muscle mass. *British Journal of Sports Medicine*, 52, 376-384.

Nasseri, A. T., Rasoul-Amini, S., Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y. (2011). Single cell protein: production and process. *American Journal of Food Technology*, 6, 103-116.

Phillips, S. M. (2014). A brief review of protein supplementation. *Sports Medicine*, 44, S71-S77.

Phillips, S. M., & Van Loon, L. J. (2011). Dietary protein for athletes. *Journal of Sports Sciences*, 29, S29-S38.

Ritala, A., Häkkinen, S., Toivari, M., & Wiebe, M. (2017). Single cell protein—state of the art. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2009.

Tipton, K. D., & Wolfe, R. R. (2004). Protein and amino acids for athletes. *Journal of Sports Sciences*, 22, 65-79.

Young, V. R., & Pellett, P. L. (1994). Plant proteins. *American Journal of Clinical Nutrition*, 59, 1203S-1212S.