

การออกแบบและนวัตกรรมในงานสถาปัตยกรรมอวกาศ**Innovation and Design in Space Architecture**วิสิฐ กวະปาณิก¹, ศศิธร คล้ายชม²

Wisit Kawayapanik, Sasithorn Klaichom

^{1,2}มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330^{1,2} Rajamangala University of Technology Tawan-ok : Uthenthawai Campus, Faculty of Engineering and
225 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330¹ Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus

* E-mail: wisit.kaw@mutto.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นคว้าและนำเสนอแง่มุมในสาขาสถาปัตยกรรมอวกาศ ลักษณะการทำงานและแนวทางการพัฒนาต่อวิศวกรรมวิชาชีพผู้นำสถาปัตยกรรมอวกาศซึ่งเป็นสาขาอาชีพใหม่ในอนาคตเพื่อรองรับการเติบโตทางด้านธุรกิจอวกาศ โดยในบทความนี้จะรวบรวมบทความงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันในเชิงสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมโครงสร้างจากฐานข้อมูล ScienceDirect ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านสถาปัตยกรรมอวกาศซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบที่พักอาศัยนอกโลกสำหรับสภาพแวดล้อมที่รุนแรงในอวกาศ เช่น การแผ่รังสีสูง ความดันบรรยากาศต่ำ และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รุนแรง สถาปนิกอวกาศจะต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยเป็นสำคัญ สถาปัตยกรรมอวกาศไม่เพียงแต่มีการประยุกต์ใช้ในการสำรวจอวกาศเท่านั้น แต่ยังมีความเป็นไปได้สำหรับการนำมาพัฒนาใช้งานบนโลกได้ด้วยโดยการรวมหลักการทางนิเวศวิทยาและแนวคิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน สถาปัตยกรรมอวกาศสามารถมีส่วนช่วยในการสร้างสรรค์อาคารพักอาศัยที่ยั่งยืนบนโลก โดยปัจจุบันมีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องคือ คณะกรรมการเทคนิคสถาปัตยกรรมอวกาศ (SATC) สถาบันการบินและนักบินอวกาศอเมริกัน (AIAA) มีบทบาทสำคัญในการพัฒนางานวิชาชีพสถาปัตยกรรมอวกาศและแบ่งปันข้อมูลความรู้ต่างๆ และยังมีคณะกรรมการย่อยที่เกี่ยวข้องโดยมุ่งเน้นไปที่การสำรวจและส่งเสริมการประยุกต์ใช้หลักการสถาปัตยกรรมอวกาศ โดยรวมแล้วสถาปัตยกรรมอวกาศเป็นวิชาชีพที่ท้าทายสำหรับผู้สนใจในการออกแบบที่พักอาศัยนอกโลก ภายใต้สภาพแวดล้อมที่รุนแรงและมุ่งเน้นไปที่การออกแบบอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: สถาปัตยกรรมอวกาศ, ที่พักอาศัยนอกโลก, สภาพแวดล้อมที่รุนแรง, การออกแบบอย่างยั่งยืน

Abstract

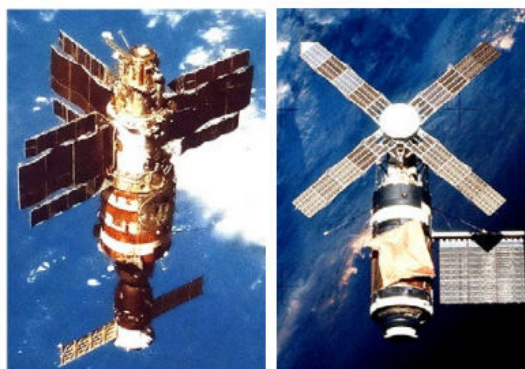
This article aims to explore and present aspects of space architecture, including the nature of the work and the approach to developing this emerging profession into space architects, a new career field in the future to support the growth of the space industry. The article will compile past and present research articles related to space architecture and structural engineering from the ScienceDirect database, focusing on designing extraterrestrial habitats for harsh space environments, such as high

radiation, low atmospheric pressure, and extreme temperature fluctuations. Space architects must prioritize safety. Space architecture not only applies to space exploration but also has potential applications on Earth. By integrating ecological principles and sustainable development concepts, space architecture can contribute to creating sustainable housing on Earth. Currently, the relevant organization is the Space Architecture Technical Committee (SATC) of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), which plays a crucial role in developing the space architecture profession and sharing knowledge. Additionally, there are related subcommittees focused on exploring and promoting the application of space architecture principles. Overall, space architecture is a challenging and exciting field for those interested in designing extraterrestrial habitats under extreme conditions, with a focus on sustainability.

Keywords: Space architect, Moon habitat, Mars habitat, Extreme environment, Sustainable design

1. บทนำ

การมีส่วนร่วมอย่างเต็มที่ของสถาปนิกและนักออกแบบอุตสาหกรรมในวงการอวกาศเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1960 ณ ประเทศสหภาพสาธารณรัฐสังคมนิยมโซเวียต สตูดิโอของ วลาดิมีร์ เชโลเมีย (Vladimir Chelomei) ออกแบบสถานีอวกาศซาลูต 1 (Salyut 1) ซึ่งถูกบุกเบิกในปี ค.ศ. 1971 ในสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1968 นักออกแบบอุตสาหกรรมเรย์มอนด์ โลวี (Raymond Loewy) ได้โน้มน้าว NASA ให้ติดตั้งหน้าต่างเข้าไปในสถานีอวกาศสกายแล็บ (Skylab space station) เพื่อให้นักบินสามารถมองออกและสังเกตโลกได้ สกายแล็บถูกบุกเบิกในปี ค.ศ. 1973 การเริ่มต้นของการเดินทางของมนุษย์สู่อวกาศนำโดยวิศวกรที่พัฒนาระบบการขนส่งและระบบการสนับสนุนต่อการดำรงชีวิตที่จำเป็น ซึ่งขณะนั้นยังไม่เห็นความจำเป็นของนักสถาปนิกในการออกแบบสถานีอวกาศแต่ NASA มุ่งเน้นไปที่การออกแบบงานระบบสำหรับนักบินอวกาศมากกว่า ในตอนแรกของทศวรรษ ค.ศ. 1970 สถาปนิกไม่กี่คนที่ได้มีส่วนร่วมและแสดงความคิดเห็นในการออกแบบสถานีอวกาศ และในปลายทศวรรษนั้นความสนใจของ NASA ในการสร้างสถานีอวกาศเปิดรับความต้องการในการออกแบบเชิงสถาปัตยกรรมเป็นการเปิดโอกาสให้สถาปนิกเข้ามามีส่วนร่วมมากขึ้น ภายหลังโครงการ Space Station Freedom ได้เปิดโอกาสเพิ่มเติมในการรวมสถาปนิกใน NASA และสถาบันการศึกษาที่ทำงานร่วมกันในศาสตร์ของอุตสาหกรรมที่กำลังเจริญขึ้นที่เรียกว่า "สถาปัตยกรรมอวกาศ" (Space Architecture Technical Committee, 2014)



รูปที่ 1 สถานีอวกาศ Salyut 7 และ Skylab Space Station
ที่มา: Space Architecture Technical Committee, 2014.

ในปัจจุบันสถาปนิกอวกาศและนักออกแบบในอุตสาหกรรมอวกาศกำลังทำงานในวงการอวกาศอย่างเต็มที่ และเข้าร่วมในทุกด้านของโครงการเกี่ยวกับอวกาศรวมถึง การออกแบบหุ่นยนต์สำรวจอวกาศ การออกแบบฐานบนดวงจันทร์ และดาวอังคาร การวางแผนการก่อสร้างสถานีวิจัยอวกาศ การศึกษาทดสอบใต้น้ำในสภาวะไร้น้ำหนัก วงวิศวกรรมงานระบบ การสนับสนุนภารกิจอวกาศและการออกแบบก่อสร้างที่อยู่อาศัยในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงบนโลก โดยหลักการทำงานในงานสถาปัตยกรรมอวกาศเป็นการขยายความเข้าใจของงานสถาปัตยกรรมบนโลกให้กว้างมากขึ้น เพื่อนำไปใช้งานภายนอกโลก เช่น บนดาวอังคารหรือดวงจันทร์ สิ่งที่สถาปนิกอวกาศต้องคำนึงถึงจะแตกต่างจากงานสถาปัตยกรรมบนโลก คือ เงื่อนไขสิ่งแวดล้อมที่มีสภาวะรุนแรง เช่น รังสีสูง ความดันอากาศต่ำ (หรือไม่มี) แรงโน้มถ่วงต่ำ (หรือไม่มี) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างมาก แต่เป้าหมายของสถาปนิกก็ยังคงเหมือนเช่นเดิม คือ การสร้างที่พักอาศัยที่สามารถป้องกันอันตรายและการมีคุณภาพชีวิตที่ดีสำหรับผู้อยู่อาศัย ไม่ว่าจะอยู่บนโลกหรือนอกโลก และต้องเรียนรู้เทคนิคในการจัดการและรับมือกับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ หนึ่งในความท้าทายที่สถาปนิกอวกาศต้องเผชิญ คือ การออกแบบที่ต้องคำนึงว่าในอวกาศจะขาดแคลนสิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตพื้นฐานที่มนุษย์ต้องการ เช่น อากาศ พลังงาน น้ำ ระบบบำบัดน้ำเสีย การรีไซเคิลขยะและการขนส่งวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ จากโลก หากสถาปนิกได้เรียนรู้วิธีการออกแบบโครงสร้างที่พักอาศัยที่มีข้อจำกัดต่าง ๆ ข้างต้นในอวกาศได้ ก็จะมีความเป็นไปได้ที่งานสถาปัตยกรรมอวกาศจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้บนโลกได้ รวมทั้งสามารถส่งเสริมและพัฒนาสู่การออกแบบที่ยั่งยืน ดังนั้นอย่าพลาดโอกาสในการเข้าร่วมและพัฒนาตนเองเป็นสถาปนิกอวกาศเพื่อปรับปรุงการออกแบบก่อสร้างที่พักอาศัยนอกโลก รวมทั้งนำความรู้เหล่านั้นมาใช้สร้างสรรค์งานออกแบบที่พักอาศัยบนโลกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น วัตถุประสงค์ในบทความนี้ต้องการให้ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับงานด้านสถาปัตยกรรมอวกาศ ซึ่งถือเป็นเรื่องใหม่และยังมียังมีองค์ความรู้ทางด้านนี้น้อยมากในประเทศไทย ซึ่งในบทความนี้ได้แนะนำมหาวิทยาลัยที่เปิดสอนทางด้านสถาปัตยกรรมอวกาศเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อและนำความรู้มาพัฒนางานด้านสถาปัตยกรรมอวกาศในประเทศไทย และยังได้รวบรวมรูปแบบของที่พักอาศัยนอกโลกจากงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้เป็นแนวคิดพื้นฐานสำหรับต่อยอดการออกแบบอาคารพักอาศัยนอกโลกในอนาคต โดยกำหนดขอบเขตของบทความที่ศึกษารูปแบบที่พักอาศัยนอกโลกซึ่งเกี่ยวข้องกับงานสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมโครงสร้างและหวังว่าบทความนี้จะสร้างแรงบันดาลใจให้กับสถาปนิกและวิศวกรจากรั้วอุเทนถวายที่มีความสนใจงานด้านสถาปัตยกรรมอวกาศและพัฒนาตนเองไปสู่สถาปนิกอวกาศต่อไปในอนาคต



รูปที่ 2 การนำที่พักอาศัยนอกโลกแบบ Self-deployable มาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายจากแผ่นดินไหว
ที่มา: Space Architecture Technical Committee, 2014.

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สถาปัตยกรรมอวกาศ (The Field of Space Architecture) ยังเป็นวิชาใหม่ที่กำลังเจริญขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มในการจ้างงานมากขึ้น ซึ่งโดยปกติจะขึ้นอยู่กับ การสนับสนุนจากรัฐบาลในโครงการสำรวจอวกาศและโครงการพาณิชย์ต่าง ๆ ที่ยังมีขอบเขตจำกัดอยู่ในขณะนี้ เหล่าสถาปนิกควรเตรียมตัวทางเทคนิคและติดตามข่าวสารและพัฒนาการทางด้านอวกาศที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูล ในวงการสถาปัตยกรรมและการก่อสร้างได้พัฒนาแนวคิดการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการพัฒนาที่พักอาศัยในอวกาศอย่างจริงจังและมีการส่งแบบที่พักอาศัยนอกโลกประกวดกันมากขึ้น ในปัจจุบันสถาปนิกอวกาศส่วนใหญ่มาจากหน่วยงานอวกาศของรัฐเป็นหลักซึ่งยังมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับตลาด "อวกาศใหม่" ที่กำลังนำโอกาสมาให้กับธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับการผลิตของอุตสาหกรรมอวกาศ สถาปนิกอวกาศจำเป็นต้องเตรียมตัวให้พร้อมทั้งทางด้านภาษาและความสามารถเชิงออกแบบ นอกจากการศึกษาในวิชาสถาปัตยกรรมตามปกติแล้ว สถาปนิกอวกาศยังต้องพัฒนาความเข้าใจในสภาพแวดล้อมในอวกาศและผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และการออกแบบสิ่งแวดล้อม สถาปนิกอวกาศจะต้องสามารถสรุปความรู้ในการออกแบบเชิงเทคนิคจากสภาพแวดล้อมบนโลกทั่วไปไปสู่สภาพแวดล้อมที่สภาวะสุดขีดในอวกาศ และมีความรู้เพิ่มเติมในด้านวิศวกรรม หรือการวิจัยสถาปัตยกรรมที่เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมของอวกาศ ก็จะช่วยให้เพิ่มศักยภาพในการทำงานในด้านนี้มากยิ่งขึ้น (Space Architecture Technical Committee, 2014)



รูปที่ 3 ประภาดแบบ Transhab, NASA, Kriss Kennedy, Constance Adams, 1999-2000

ที่มา: Space Architecture Technical Committee, 2014.



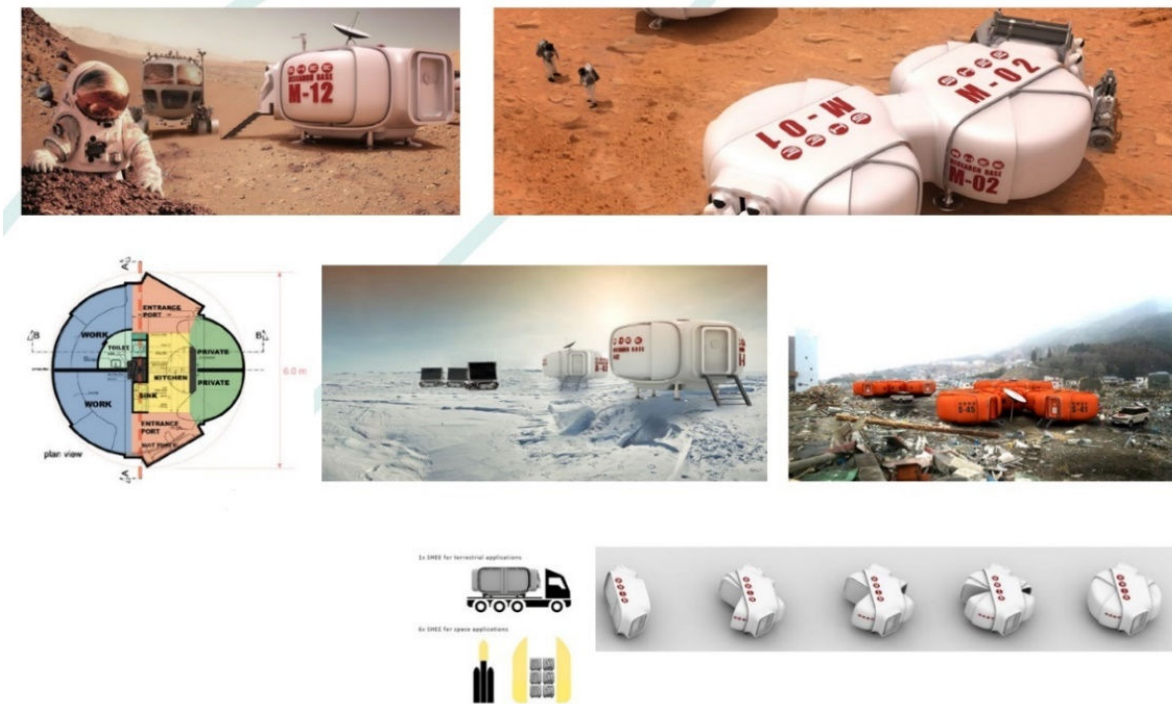
รูปที่ 4 ระบบ Trigon ใช้การรวมตัวของหุ่นยนต์เองเพื่อใช้ในการก่อสร้างในอวกาศ
ที่มา: Space Architecture Technical Committee, 2014.

เนื่องด้วยสถาปัตยกรรมอวกาศ (Space Architecture Education) เป็นสาขาวิชาที่กำลังเติบโตและเป็นการบูรณาการความรู้ในหลาย ๆ ศาสตร์มาประยุกต์ใช้ ผู้สนใจจะต้องมีความมุ่งมั่นในการเรียนรู้และมีการพัฒนาตนเองอย่างต่อเนื่องและในปัจจุบันมีสถาบันการศึกษาที่เปิดสอนหลักสูตรสถาปัตยกรรมอวกาศ เช่น Sasakawa International Center for Space Architecture (SICSA) หลักสูตรปริญญาโท Master of Science in Space Architecture เป็นหน่วยงานภายใต้คณะวิศวกรรมศาสตร์ University of Houston (USA), TU Wien Academy (Austria) หลักสูตรปริญญาโทด้านการบริหาร Executive MBA Space Architecture Program, Andy Thomas Centre for Space Resource เป็นหน่วยงานภายใต้คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ University of Adelaide (Australia) ทำงานวิจัยทางด้าน Off-Earth Construction ในระดับปริญญาโทและเอก (Space Architecture Technical Committee, 2014)

คณะกรรมการด้านเทคนิคสถาปัตยกรรมอวกาศ (SATC) เป็นหนึ่งในคณะกรรมการด้านเทคนิค (TC) ภายใต้สถาบันอากาศยานและอวกาศอเมริกัน (AIAA) การเป็นสมาชิกใน AIAA เป็นเงื่อนไขสำคัญตามกฎหมายการเป็นสมาชิกใน SATC แต่ยังมีสถาปนิกอวกาศหลายคนที่ไม่ได้เป็นสมาชิกของ AIAA หรือ SATC บางคนเป็นอดีตสมาชิกหรือเป็นคนที่มีส่วนร่วมกับสมาคมวิชาชีพอื่น ๆ จึงมีการจัดตั้งเว็บไซต์และเพจ SpaceArchitect ซึ่งเป็นองค์กรที่เป็นอิสระเพื่อรวมสถาปนิกอวกาศจากสมาคมอาชีพต่าง ๆ การเป็นสมาชิกในเพจยังเปิดโอกาสให้บุคคลที่เกี่ยวข้องกับอาชีพในการออกแบบที่พักอาศัยของมนุษย์หรือระบบการสำรวจอวกาศ เช่น เป็นสมาชิกในสมาคมสถาปนิก หรือ กลุ่มคนที่ปฏิบัติอาชีพออกแบบ หรือนักศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม การเข้าร่วมกลุ่มเพื่อจะเชื่อมโยงกับกลุ่มสถาปนิกอวกาศระหว่างประเทศและจะมีโอกาสเรียนรู้แลกเปลี่ยนความเห็นเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมอวกาศ อีกทั้งยังมีโอกาสพูดคุยกับสถาปนิกอวกาศที่มีประสบการณ์และข้อเสนอแนะสำหรับในการทำงาน การศึกษา การวิจัย หรือแนวคิดและกิจกรรมต่าง ๆ จึงเป็นโอกาสอันดีที่เหล่านักศึกษา สถาปนิกและวิศวกรจะได้มีโอกาสก้าวเข้าสู่แวดวงสถาปัตยกรรมอวกาศ (Space Architecture Technical Committee, 2014)

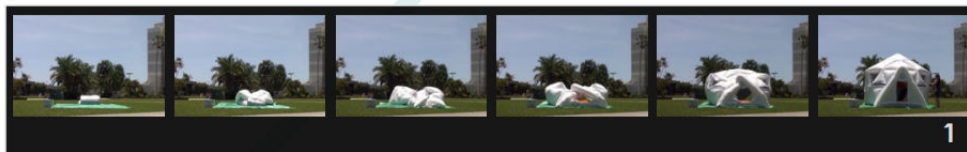
การศึกษาของ Kawayapanik, Thubthun, Lohmeng, & Klaichom (2024) พบว่า ลักษณะตัวอย่างรูปแบบอาคารพักอาศัยบนดวงจันทร์และดาวอังคาร (Moon & Mars habitat) มีหลายรูปแบบพัฒนาตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการก่อสร้างในช่วงระยะเวลานั้น ๆ ตั้งแต่ ค.ศ. 1992-ปัจจุบัน โดยจะแบ่งกลุ่มตามลักษณะสถานที่ตั้ง (Site feature) รูปแบบโครงสร้าง (Structural concepts) และฟังก์ชันการใช้งาน (Habitable functions) ดังนี้

1. โครงสร้างทั่วไป (Generic structures) เป็นรูปแบบโครงสร้างปกติทั่วไปบนโลกซึ่งในช่วงแรกยังไม่ได้คำนึงถึงการก่อสร้างและเลือกใช้วัสดุทดแทนคอนกรีตเป็นหลัก เช่น โครงถัก เคเบิล โครงอลูมิเนียม 3 มิติ
2. โครงสร้างแบบพองลม (Inflatable structures) โครงสร้างแบบโดมที่พองได้ดูเหมือนจะเป็นระบบโครงสร้างที่พบมากที่สุด เนื่องจากสามารถทนต่อแรงดึงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและก่อนการพองจะใช้พื้นที่น้อยมาก รวมทั้งสามารถขนส่งได้ง่าย
3. โครงสร้างแบบปรับได้ (Deployable structures) โครงสร้างที่ขยายได้เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่นิยมสำหรับการสำรวจอวกาศเนื่องจากสามารถขยายภายหลังได้ ระหว่างขนส่งจะพับเก็บทำให้ประหยัดพื้นที่ในยานขนส่ง อย่างไรก็ตามจนถึงตอนนี้การประยุกต์ใช้โครงสร้างที่ขยายได้ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่โครงสร้างขนาดเล็กและเบา



รูปที่ 5 รูปแบบที่พักอาศัย Self-deployable habitat for extreme environments,
SHEE Consortium 2014

ที่มา: Space Architecture Technical Committee, 2014.



รูปที่ 6 รูปแบบที่พักอาศัย Crystal - rapidly self-deployable habitat demonstrator,
Florida institute of technology, 2012.

ที่มา: Space Architecture Technical Committee, 2014.

โครงสร้างพิมพ์ 3 มิติ (3D printed structures) ด้วยข้อจำกัดด้านต้นทุนและปริมาณของการขนส่งวัสดุจากโลก การใช้ทรัพยากรในสถานที่ (In-Situ Resource Utilization - ISRU) จึงน่าสนใจมาก ISRU แนะนำให้ใช้วัสดุพื้นเมือง เช่น ละอองหินบนดวงจันทร์ ร่วมกับหุ่นยนต์เพื่อสร้างโครงสร้างนอกโลก แรก ๆ แนวคิดของโครงสร้างที่พิมพ์ด้วย 3D จากละอองหินบนดวงจันทร์และดาวอังคาร มาจากสมมติฐานว่าละอองหินบนดวงจันทร์และดาวอังคารมีคุณสมบัติทางโครงสร้างวัสดุที่สามารถรับกำลังได้เมื่อได้รับการพัฒนาและใช้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 7 รูปแบบการพิมพ์ 3 มิติ

ที่มา: Kalapodis, Kampas, & Ktenidou, 2020.



รูปที่ 8 การประกวดแบบพิมพ์ 3 มิติ

Martian habitats constructed during Phase III of NASA's 3D-Printed Habitat Challenge

ที่มา: Malott, D., 2019.

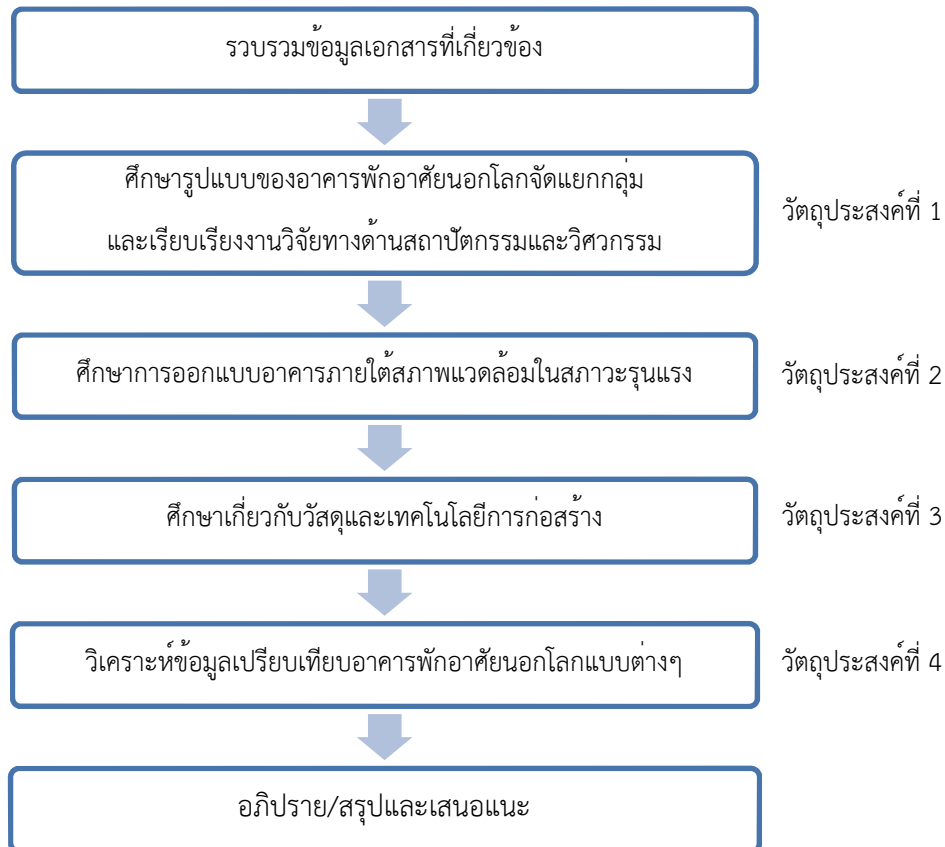
ตารางที่ 1 รูปแบบอาคารที่พักอาศัยนอกโลก (แก้ไขดัดแปลงจาก Kalapodis, Kampas, & Ktenidou, 2020)

Research	Types	Analysis Approach	Materials
Benaroya & Ettouney (1992)	Flat Truss	LS	N/A
Ettouney et al. (1992)	Cabled	N/A	N/A
Benaroya & Ettouney (1992)	Steel	LS, LD	Steel
Nowak & Sadeh (1992)	Inflatable	LS, FEA	Kevlar 49
Benaroya (1993)	Tension cable	N/A	N/A
Sadeh & Criswell (1993)	Inflatable	LS, FEA	Kevlar 49
Jolly et al. (1994)	Flat Truss	LS	Composite material with a density of 1.523 kg/m ³ (assumption)
Malla et al. (1995)	Flat Truss	LS, LD, FEA	Aluminum
Abarbanel et al. (1996)	Inflatable	LS, FEA	Isotropic Kevlar 49
Cadogan et al. (1999)	Inflatable	N/A	Kevlar
Kennedy (1999)	Inflatable	AA	Kevlar
Aulesa et al. (2000)	Dome	LS	Cast basalt
Bateman et al. (2000)	Inflatable	LS, FEA	Kevlar
Kennedy (2000)	Inflatable	LS, FEA	Kevlar, Bias fibers at an angle of 67 deg
Jenkins and Tampi (2000)	Inflatable	LD	Mylar polyester
Borin & Fiscelli (2004) [	Inflatable	AA	Five layers made of mainly Kevlar
Criswell & Carlson (2004)	Inflatable	LS	Kevlar
Adams & Petrov (2006)	Inflatable	AA	Shell made by Kevlar and core made by carbon fiber
Ng (2006)	Deployable	LD, FEA	laminates of AS4 Carbon PEEK
Tinker et al. (2006)	Inflatable & Deployable	N/A	Varies (review paper)
Benaroya (2006)	Arch	FEA	High strength aluminum
Ruess et al. (2006)	Arch	FEA	High strength aluminum
Meyers & Toutanji (2007)	Hemispherical Dome	LS, TA	Waterless regolith concrete and glass fibers
Malla & Chaudhuri (2008)	Truss & Inflatable	NLD	Frame of aluminum, membrane of Kevlar
Faieron et al. (2010)	Vousoir Dome	LS	Regolith combined with aluminum powder
Khoshnevis & Zhang (2012)	3D-printed	N/A	Regolith & sulfur concrete
Malla & Gionet (2013)	Truss & inflatable	NLD	Frame of aluminum, membrane of Kevlar
Cesarreti et al. (2014)[	3D-printed	FEA	Regolith simulant (DNA)
Mottaghi & Benaroya (2015)	Igloo-shaped	TA	Magnesium alloy
Brandt-Olsen et al. (2018)	Inflatable	FEA	Kevlar cable and ETFE membrane
Woodruff & Filipov (2018)	Deployable	FEA and empirical methods	Mylar
Yihong Hong et al (2018)	Deployable	LS	Aluminium composite
Dekai Zhou et al (2021)	3D-printed & cable	FEA	Regolith
Amin Lak & Maziar Asefi (2022)	Deployable	LS, FEA	Kevlar
Federica Zaccardi et al (2022)	3D-printed	FEA	Regolith with polyester

Note: LS: Linear Static analysis, LD: Linear Dynamic analysis, NLD: Nonlinear Dynamic analysis, LV: Laser Vibrometer, FEA: Finite Element Analysis, TA: Thermal Analysis, AA: Architectural Approach, RVA: Random Vibrations Analysis, MA: Modal Analysis.

3. ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้รวบรวมข้อมูลจากฐานข้อมูล ScienceDirect เพื่อศึกษารูปแบบอาคารพักอาศัยนอกโลกและจัดกลุ่มประเภทของอาคาร รวมทั้งศึกษาการออกแบบอาคารภายใต้สภาพแวดล้อมในสภาวะรุนแรง (Extreme condition) และศึกษาเกี่ยวกับวัสดุและเทคโนโลยีการก่อสร้างที่ใช้กับอาคารพักอาศัยนอกโลก จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรูปแบบอาคารพักอาศัยนอกโลก เมื่อได้ทำตามวัตถุประสงค์ทั้งหมดแล้วจึงทำการอภิปราย สรุปและเสนอแนะ (Kawayapanik, Thubthun, Lohmeng, & Klaichom, 2024)



รูปที่ 9 แผนผังระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

4. ผลการวิจัย

การออกแบบและการพัฒนาที่อยู่อาศัยบนดวงจันทร์และดาวอังคารได้ศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีก่อสร้างในปัจจุบันสามารถทำให้เกิดวิธีการออกแบบใหม่ ๆ ที่จะนำไปใช้ในการสร้างที่พักอาศัยนอกโลกได้จริง

การออกแบบในอดีต

- 1) Generic structures แนวคิดเริ่มต้น (ปี 1960-1980)

ในยุคพอลโล แนวคิดเริ่มแรกสำหรับฐานบนดวงจันทร์มุ่งเน้นไปที่โครงสร้างที่เรียบง่ายหรือฐานใต้ดินเพื่อป้องกันรังสีและอุกกาบาต ขณะที่แนวคิดสำหรับดาวอังคารยังคงเป็นเพียงทฤษฎีและมักพบในวรรณกรรมวิทยาศาสตร์ เนื่องจากเทคโนโลยีที่มีอยู่ในขณะนั้นจำกัดอยู่ที่สิ่งที่สามารถขนส่งและก่อสร้างได้จริงด้วยเทคโนโลยีจรวดที่มีอยู่

2) Modular and Prefabricated Structures (ปี 1990-2000)

การพัฒนายานสำรวจอวกาศและยานขนส่งขนาดใหญ่ทำให้การออกแบบโครงสร้างแบบโมดูลาร์และสำเร็จรูปเป็นไปได้มากขึ้น ซึ่งสามารถประกอบเข้าด้วยกันเป็นฐานได้ การออกแบบมุ่งเน้นที่ความยั่งยืนและทนทานภายในสภาพแวดล้อมปิด รวมถึงการใช้เคลือบอากาศและน้ำ นอกจากนี้ยังเริ่มพิจารณาถึงสุขภาพจิตของนักบินอวกาศในพื้นที่ที่จำกัดด้วย

เทคโนโลยีปัจจุบันและอนาคต

1) Inflatable habitats

การพัฒนาวิทยาศาสตร์วัสดุนำไปสู่ผ้าที่ทนทานและเบาที่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมในอวกาศได้ นำไปสู่การออกแบบที่อยู่อาศัยแบบเป่าลม เช่น โมดูล BEAM ของ Bigelow Aerospace ซึ่งได้รับการทดสอบบนสถานีอวกาศนานาชาติ โครงสร้าง Inflatable มีขนาดกะทัดรัดระหว่างการเดินทางและขยายออกเมื่อติดตั้ง และมีอัตราส่วนปริมาตรต่อมวลที่ดีกว่าโครงสร้างแข็ง

2) 3D Printing and ISRU (In-Situ Resource Utilization)

การออกแบบในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การใช้วัสดุท้องถิ่น เช่น ฝุ่นดวงจันทร์ (Regolith) สำหรับการก่อสร้าง เพื่อลดความจำเป็นในการขนส่งวัสดุจากโลก ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและความซับซ้อนด้านโลจิสติกส์ องค์การอวกาศยุโรป (ESA) และ NASA ได้พัฒนาต้นแบบที่แสดงให้เห็นถึงเทคโนโลยีการพิมพ์ 3D โดยใช้ดินเลียนแบบจากดวงจันทร์และดาวอังคาร

3) Hybrid and Deployable Structures

เป็นการรวมข้อดีจากโครงสร้างแข็ง (Rigid structure) และโครงสร้างเป่าลม (Inflatable structure) เพื่อเพิ่มความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และความเสถียรของโครงสร้างที่สามารถพับเก็บได้ ซึ่งมีขนาดกะทัดรัดระหว่างการขนส่งและสามารถขยายหรือประกอบโดยอัตโนมัติบนดวงจันทร์หรือดาวอังคารกำลังอยู่ในขั้นตอนการทดสอบ

4) Autonomous Building Technologies

หุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติกำลังถูกพัฒนาเพื่อก่อสร้างที่อยู่อาศัยก่อนที่มนุษย์จะมาถึง หรือช่วยเหลือนักบินอวกาศในการสร้างและบำรุงรักษาที่อยู่อาศัย วิธีนี้ช่วยลดความเสี่ยงต่อชีวิตมนุษย์และเร่งกระบวนการตั้งฐานเริ่มต้นให้รวดเร็วยิ่งขึ้น

5) Human-Centric Design

การออกแบบสมัยใหม่ให้ความสำคัญกับสภาวะจิตใจและสังคมของการอยู่ในอวกาศเป็นระยะเวลานาน เช่น ออกแบบหน้าต่างขนาดใหญ่ พื้นที่ส่วนกลาง และสิ่งอำนวยความสะดวกที่ทำให้สภาพแวดล้อมรู้สึกเหมือนอยู่บนโลกมากขึ้น นอกจากนี้ ยังเน้นการสร้างพื้นที่ที่สามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับภารกิจระยะยาวที่ต้องการความยืดหยุ่น

ตารางที่ 2 ข้อดีและข้อจำกัดของอาคารพักอาศัยนอกโลกแต่ละรูปแบบ (แก้ไขดัดแปลงจาก Kawayapanik, Thubthun, Lohmeng, & Klaichom, 2024)

รูปแบบ	ข้อดี	ข้อจำกัด
Generic Structures	ทนทานและแข็งแรง	ต้นทุนการขนส่งสูงและซับซ้อน
	ใช้วิธีการก่อสร้างที่คุ้นเคย	ไม่ยืดหยุ่นและขยายขนาดได้จำกัด
	ป้องกันรังสีและอุกกาบาตได้ดี	
Inflatable Habitats	ประหยัดพื้นที่ระหว่างการขนส่ง	มีโอกาสนั่งพองลมถูกตีแทงได้
	สามารถทำให้ปริมาตรภายในที่ใหญ่ขึ้นหลังจากการขยาย	ต้องการการป้องกันรังสีเพิ่มเติมด้วยการคลุมด้วยเรโกลิส
	ออกแบบได้หลากหลาย	
3D printing	ใช้วัสดุในท้องถิ่นลดการขนส่งจากโลก	ยังต้องพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์ 3D เพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมรุนแรง
	ปรับแต่งได้เพื่อตอบสนองความต้องการและปรับตามสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม	คุณสมบัติของวัสดุและความทนทานยังไม่แน่นอน
Hybrid and Deployable Habitats	รวมข้อดีของหลายประเภท	มีความซับซ้อนในการออกแบบและการประยุกต์ใช้เพิ่มขึ้น
	ใช้พื้นที่ในการขนส่งน้อย	ต้องรักษาความสมบูรณ์ของโครงสร้างให้ได้เมื่อโครงขยายตัวออก
	ประกอบได้เร็ว	ต้องการการป้องกันรังสีเพิ่มเติม
Autonomous Building Technologies	ลดความเสี่ยงภัยต่อมนุษย์	ยังต้องพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์
	ก่อสร้างอย่างมีแบบแผนเป็นระบบ	การทำงานในระยะแรกจะช้าเนื่องจากเป็นระบบใหม่

4. การอภิปรายและเสนอแนะ

จากการศึกษารูปแบบอาคารพักอาศัยนอกโลกจากอดีตจนถึงปัจจุบันจะเห็นว่า สาขาวิชาสถาปัตยกรรมอวกาศเป็นส่วนต่อขยายของงานสถาปัตยกรรมหลักที่ต้องมีการคิด พิจารณาให้ลึกซึ้งมากขึ้น กว้างมากขึ้น บนเงื่อนไขที่มีขีดจำกัดและสภาพแวดล้อมที่สภาวะรุนแรงสุดขีด ซึ่งจะแตกต่างกับงานสถาปัตยกรรมบนโลก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของการป้องกันรังสี สภาวะไร้น้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรุนแรง พายุสุริยะ สภาวะฝุ่นพิษ แผ่นดินไหว วัสดุและขั้นตอนการก่อสร้าง ฯลฯ จึงเป็นความท้าทายอย่างมากสำหรับสถาปนิกรุ่นใหม่ที่ต้องการทำงานที่ฉีกออกจากขอบเขตเดิม ๆ และยังต้องมียุทธศาสตร์ความรู้ด้านวิศวกรรมอื่น ๆ มาบูรณาการ เพื่อให้สามารถออกแบบที่พักอาศัยนอกโลกที่สามารถก่อสร้างได้จริง โดยใช้วัสดุบนดาวดวงนั้น ๆ ให้มากที่สุด เพื่อลดภาระการลำเลียงวัสดุจากโลกและการประยุกต์ใช้เทคนิคการก่อสร้างสมัยใหม่ เช่น 3D printing ในด้านตลาดงานในต่างประเทศอุตสาหกรรมอวกาศกำลังเปิดกว้างให้คนที่มีความรู้ความสามารถเข้ามาร่วมทำงาน และสำหรับในแง่การศึกษาสามารถต่อยอดได้ทั้ง Master's Degree และ Non Degree ทั้งนี้ผู้ที่สนใจยังสามารถสมัครเป็นสมาชิกของ AIAA และหาข้อมูลต่างๆในการออกแบบ รวมทั้งการฝึกอบรมเกี่ยวกับการออกแบบทางสถาปัตยกรรมอวกาศอีกด้วย จึงนับเป็นโอกาสที่ดีสำหรับนักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ของโรงเรียนช่างก่อสร้างอุเทนถวายที่จะต้องเปลี่ยนแปลงและพัฒนาตนเองเพื่อให้พร้อมสำหรับงานในสาขาสถาปัตยกรรมอวกาศและแสดงศักยภาพเชิงวิชาการให้เป็นที่ประจักษ์ว่ากว่า 90 ปีที่ผ่านมา อุเทนถวายคือกระดูกสันหลังของด้านก่อสร้างอย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

- Kalapodis, N., Kampas, G., & Ktenidou, O. (2020). A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts. *Acta Astronautica*, **175**, 540-569.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.038>
- Kawayapanik, W., Thubthun, N., Lohmeng, A., & Klaichom, S. (2024, March 29-31). Space architecture design: Stage of the art review. *The 29th National Convention on Civil Engineering*, Chiang Mai, Thailand.
- Malott, D. (2019). *AI spacefactory's MARSHA wins 1st place in the finale of NASA's 3D printed habitats*. <https://www.designboom.com/architecture/ai-spacefactory-marsha-wins-nasa-3d-printed-habitat-challenge-finale-05-08-2019>.
- Space Architecture Technical Committee. (2014). *How to become a space architect*. (2nd ed.).
<https://spacearchitect.org/how-to-become-a-space-architect>.