



GESTALT FINDEN: ว่าด้วยแนวความคิดในการออกแบบของ ไพโร โอทโท



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม แบบ 1.1 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาสถาปัตยกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

GESTALT FINDEN: ว่าด้วยแนวความคิดในการออกแบบของ ไพร์ โอทโท



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม แบบ 1.1 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

ภาควิชาสถาปัตยกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

GESTALT FINDEN: ON FREI OTTO'S DESIGN APPROACH



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Doctor of Philosophy (Architecture)
Department of Architecture
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2020
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

61054905 : สถาปัตยกรรม แบบ 1.1 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

คำสำคัญ : Gestalt finden, ไฟร โอทโท, กระบวนการก่อรูป

นาย สิปปวิชญ์ กำบัง: GESTALT FINDEN: ว่าด้วยแนวความคิดในการออกแบบของ ไฟร โอทโท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ต้นข้าว ปาณินท์

รูปทรง เป็นประเด็นสำคัญในการออกแบบสถาปัตยกรรม เนื่องจากเป็นผลลัพธ์ของ กระบวนการออกแบบที่แสดงตัวให้ทุกคนได้เห็น ไฟร เพาว์ล โอทโท (31 พฤษภาคม ค.ศ.1925 - 9 มีนาคม ค.ศ.2015) เป็นสถาปนิกชาวเยอรมันคนสำคัญคนหนึ่งในประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรมใน ศตวรรษที่ 20 ซึ่งได้รับรางวัลในระดับนานาชาติมากมาย รวมถึงรางวัล Pritzker prize เมื่อปี ค.ศ. 2015 ไฟร โอทโท ได้รับการยอมรับว่าเป็นผู้บุกเบิกการออกแบบโครงสร้างเบาซึ่งได้รับแรงบันดาลใจ จากธรรมชาติ แต่นั่นก็เป็นประเด็นปัญหาสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เนื่องจากมีวรรณกรรมจำนวนมากที่ กล่าวถึงการสร้างรูปทรงของไฟร โอทโท หรือ gestalt ในภาษาเยอรมัน โดยมุ่งนำเสนอผลงานการ ออกแบบที่มีรูปทรงแบบพลวัต และประเด็นเชิงเทคนิคการทดลองและการก่อสร้างเป็นหลัก แต่ยัง ขาดการศึกษาทำความเข้าใจปรัชญาการออกแบบของเขาอย่างจริงจัง

หลังจากเกษียณอายุงานจากมหาวิทยาลัยซตุทท์การ์ท เมื่อปี ค.ศ.1991 แล้ว สถาบันการ ออกแบบโครงสร้างเบาที่เขาได้ก่อตั้งขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1964 ได้แตกกลุ่มออกเป็นสถาบันย่อย 3 สถาบัน แต่ละสถาบันมีแนวทางในการค้นคว้าวิจัยตามแนวทางของตนเอง ซึ่งทำให้เกิดความสับสนแก่ ผู้สนใจศึกษาแนวความคิดในการออกแบบของไฟร โอทโท มากยิ่งขึ้น

การศึกษาเพื่อถอดรหัสความคิดในการออกแบบของไฟร โอทโท ช่วยทำให้สามารถจัด ระเบียบองค์ความรู้เรื่องแนวความคิดในการออกแบบของเขาได้อย่างชัดเจน เห็นวิธีการสร้าง แนวความคิดเรื่องกระบวนการก่อรูป ซึ่งมีฐานมาจากแนวคิดปรัชญาเหตุผลนิยม และบริบททาง ความคิดเรื่องเทคโนโลยีหรืออุตสาหกรรมการผลิตของประเทศเยอรมนี แนวคิดนามธรรมเหล่านี้ถูก แสดงออกผ่านการสร้างเครื่องมือทางความคิดและการปฏิบัติงานของเขา นอกจากนั้นยังทำให้เห็น ความเชื่อมโยงมาสู่กลุ่มความคิดในการออกแบบในปัจจุบันหลังจากยุคสมัยของเขาด้วย

61054905 : Major (Architecture)

Keyword : Gestalt finden, Frei Otto, Morphology

MR. SIPPAWICH KAMBUNG : GESTALT FINDEN: ON FREI OTTO'S DESIGN APPROACH
THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR DR. TONKAO PANIN

Form is an important issue due to architectural design. Man could observe form as the result of the design processes. Frei Paul Otto (31 May 1925 – 9 March 2015) is a prominent German architect of twentieth-century who won many international architecture prizes included the Pritzker prize in 2015. He was well known for his pioneering innovations in lightweight tensile structures which inspired by nature. It was the problem for the study, while most publications about him focused on his dynamic forms experimentations, and technical issues, but ignored the deep understanding of his design philosophy.

Frei Otto established the Institute for Lightweight Structures at the University of Stuttgart in 1964. After his retirement in 1991, there are three institutes separated from his way of study and research. The three institutes play important roles in their profound technical research issues, might also bewilder the study on Frei Otto.

The study to decode Otto's design concept leads to Frei Otto's body of knowledge categorization. The study reveals the concept of morphology which closely related to the philosophy of rationalism and the context of technology or industrialism in Germany. These notions translated into Frei Otto's design approach and practices. Moreover, the results of the study presented the continuity of the related contemporary design clusters after his era.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ต้นข้าว ปาณินท์ และด้วยข้อแนะนำจากกรรมการตรวจวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ เกียรติคุณอรศิริ ปาณินท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศร ศรีเสาวนันทน์ ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้รื้อนามอบทุนการศึกษาในหลักสูตรนี้ให้แก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถบริหารจัดการเรื่องการจัดซื้อตำราเอกสารภาษาเยอรมันจากต่างประเทศซึ่งเป็นเอกสารสำคัญสำหรับใช้ในการศึกษาได้ดียิ่ง องค์ความรู้ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาครั้งนี้ จะมีส่วนช่วยสำคัญในการพัฒนาตนเองของผู้วิจัย และพัฒนาการเรียนการสอนสถาปัตยกรรมต่อไป

สิปปวิชญ์ กำบัง



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ปัญหาเรื่องรูปทรงของไฟร์ โอทโท.....	4
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.4 คำถามในการวิจัย.....	9
1.5 วิธีดำเนินการศึกษา.....	10
1.6 สมมติฐานของการวิจัย.....	10
1.7 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	11
บทที่ 2 ไฟร์ โอทโท.....	12
2.1 พัฒนาการของการศึกษาและการปฏิบัติวิชาชีพสถาปัตยกรรมในเยอรมนี.....	12
2.2 ชีวิตประวัติโดยสังเขป.....	28
2.3 โครงสร้างหลังคารับแรงดึง: ปฐมบทของแนวคิดในการออกแบบของ ไฟร์ โอทโท.....	31
2.4 หลักการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึง.....	37
2.5 Finding form.....	39

บทที่ 3 สองบทบาทในการทำงานของ ไฟร โอทโท.....	42
3.1 การทำงานในฐานะนักออกแบบ	42
3.2 การทำงานในฐานะนักวิจัย	67
บทที่ 4 การแตกกระแสของแนวความคิดในการออกแบบหลังจากยุคสมัยของ ไฟร โอทโท.....	91
4.1 กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานในอาคาร Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK).....	91
4.2 กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาเครื่องมือออกแบบด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ Institute for Computational Design and Construction (ICD).....	92
4.3 กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการออกแบบโครงสร้างโดยมีต้นแบบจากสิ่งมีชีวิต Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE).....	94
บทที่ 5 บทสรุปแนวความคิดในการออกแบบของ ไฟร โอทโท	100
5.1 วิเคราะห์แนวคิดหลัก	100
5.2 การก่อสร้างแบบธรรมชาติ (Natural construction)	102
5.3 Gestalt	109
5.4 มินิมัล (minimal)	110
5.5 การค้นหารูปทรง (gestalt finden)	112
5.6 สุนทรียภาพ (Aesthetics)	114
5.7 ภาวิสัยในแนวคิดทางการออกแบบของไฟร โอทโท	124
5.8 ข้อเสนอแนะ	129
รายการอ้างอิง	139
ภาคผนวก.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	157

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 กรอบความคิดในการศึกษา.....	11
ตารางที่ 2 สรุปลการศึกษาแนวความคิดในการออกแบบของ ไพร โอทโท	129



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 รูปทรงของโครงสร้างในฟองน้ำและปะการังชนิดต่างๆ.....	1
ภาพที่ 2 Transformation between <i>Agryoplecus</i> and <i>Sternoptyx</i> and <i>Scarus</i> sp. and <i>Pomocanthus</i> แสดงการศึกษาเปรียบเทียบรูปร่างของปลาสายพันธุ์ต่างๆ ซึ่งธอมป์สันได้แสดงการวิเคราะห์รูปร่างของปลาผ่านระบบตารางที่มีหลากหลายรูปแบบ	2
ภาพที่ 3 ไฟร โอทโท (Frei Otto) ขณะที่กำลังตรวจงานก่อสร้างโครงการ German pavilion ซึ่งจัดขึ้น ณ เมืองมอนทรีออล ประเทศแคนาดา เมื่อปี ค.ศ. 1967 โครงการนี้นับว่าเป็นผลงานสถาปัตยกรรมที่มีขนาดใหญ่และเป็นผลงานระดับนานาชาติผลงานแรกของไฟรี โอทโท.....	4
ภาพที่ 4 หนังสือรวบรวมผลงานและแนวคิดของไฟรี โอทโท ซึ่งจัดพิมพ์ขึ้นเนื่องจากงานประกาศรางวัล Deutscher Werkbund winning prize ฉบับภาษาเยอรมัน (ซ้าย) และฉบับแปลเป็นภาษาอังกฤษ (ขวา)	5
ภาพที่ 5 หนังสือรวบรวมผลงานของไฟรี โอทโท ในการแสดงนิทรรศการของเขาที่ the Museum of Modern Art นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1971 เป็นหนังสือที่นำเสนอผลงานการออกแบบของเขาออกเป็นหมวดหมู่ของลักษณะโครงสร้าง ซึ่งแม้จะทำให้ผลงานของเขาได้เป็นที่รู้จักในวงกว้าง แต่ก็ขาดรายละเอียดเชิงลึกในด้านแนวความคิด	7
ภาพที่ 6 การออกแบบและก่อสร้าง ICD-ITKE research pavilion ซึ่งเป็นการร่วมมือกันของสถาบัน ICD และ ITKE มีการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการสร้างหุ่นจำลอง โครงสร้างและการวิเคราะห์โครงสร้าง การใช้เทคโนโลยีวัสดุ การก่อสร้างโดยการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ แทนมนุษย์ เป็นต้น องค์ประกอบใหม่ในการออกแบบและก่อสร้างซึ่งมีความแตกต่างจากยุคสมัยของไฟรี โอทโท เหล่านี้ เป็นส่วนหนึ่งในการทำให้การทำความเข้าใจแนวคิดของโอทโทเกิดความสับสนได้	8
ภาพที่ 7 ประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรมโบราณ (Geschichte der Baukunst der Alten) โดย โดยคริสเตียน ลุดวิก ชตีกลิทซ์ (Christian Ludwig Stieglitz)	13
ภาพที่ 8 อาคารสถาบันสถาปัตยกรรม Bauakademie ภาพวาดโดย Eduard Gärtner, 1868	14
ภาพที่ 9 ภาพประกอบจากหนังสือคู่มือประวัติศาสตร์ศิลปะของคูเกเลอร์ ซึ่งนำเสนอการศึกษาสถาปัตยกรรมคลาสสิกผ่านเรขาคณิต	15

ภาพที่ 10 การวิเคราะห์สถาปัตยกรรมโกธิคของโฮฟชตัดท์ ซึ่งแสดงให้เห็นการผสมผสานเรขาคณิตเข้ากับระบบโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรม โดยเฉพาะสถาปัตยกรรมโกธิค.....	16
ภาพที่ 11 ผลงานการออกแบบในแนวทางของกลุ่มการเคลื่อนไหวศิลปะและหัตถกรรม (Art and crafts movement) ในประเทศอังกฤษ.....	17
ภาพที่ 12 หนังสือ บ้านอังกฤษ (Das Englische Haus) ซึ่งเขียนขึ้นโดยมูเทเซอูส ตีพิมพ์ในเบอร์ลินเมื่อปี ค.ศ.1904 เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบที่อยู่อาศัยในประเทศอังกฤษ ซึ่งรวบรวมจากประสบการณ์ระหว่างที่มูเทเซอูสได้ไปศึกษาดูงาน ณ กรุงลอนดอน ในช่วงระหว่างปี ค.ศ.1896-1903 อันเป็นช่วงเวลาก่อนที่จะมีการก่อตั้งสมาพันธ์แรงงานเยอรมันไม่นาน	19
ภาพที่ 13 Deutscher Werkbund Pavilion 1914 เมืองโคตลัญจน์ ออกแบบโดยวาลเธอร์ โกรปิอุส และ ออดอล์ฟ เมเยอร์.....	20
ภาพที่ 14 อาคารเรียนบาวเฮาส์ ที่เมืองเดสเซา ออกแบบโดยวอลเธอร์ โกรปิอุส.....	21
ภาพที่ 15 ภาพเหมือนตนเอง เอล ลิลิสซิทสกี	22
ภาพที่ 16 ฮิตเลอร์ขณะวิจารณ์งานออกแบบสถาปัตยกรรม อัลแบร์ต ชแปร์ (คนที่ 2 จากซ้าย)	23
ภาพที่ 17 หุ่นจำลองเมืองแกร์มานเนีย (Germania).....	24
ภาพที่ 18 การใช้โครงสร้างรับแรงดึงส่วนหลังคาของสนามราเลก์ อารีน่า	25
ภาพที่ 19 บ้านพักอาศัยและสตูดิโอทำงานของไฟร โอทโท ที่วาร์มบรอนน์.....	26
ภาพที่ 20 ภาพร่างโครงการอพาร์ทเมนต์ในนิวยอร์ก โดยไฟร โอทโท ค.ศ. 1959.....	27
ภาพที่ 21 ไฟร โอทโท (Frei Otto).....	28
ภาพที่ 22 สะพานข้ามแม่น้ำออยเรอ (Eure) ใกล้เมืองชาร์ต (Chartres) ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งไฟร โอทโทออกแบบในช่วงเป็นเชลยสงคราม ค.ศ. 1946 แสดงให้เห็นถึงความสนใจเรื่องการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงของเขา.....	29
ภาพที่ 23 ไฟร โอทโท และ โบโด ราช ภาพปิดสำหรับการแสดงผลงานการออกแบบในโอกาสรับรางวัล Deutscher Werkbund winning prize 1992.....	31
ภาพที่ 24 Raleigh arena	32

ภาพที่ 25 การทดลองการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงของไฟร โอทโท ในงานดุษฎีนิพนธ์ แสดงการแบ่งพื้นที่ของผิวรับน้ำหนักออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของแรงกระทำ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ในเชิงโครงสร้างผ่านอูโมงค์ลมต่อไป.....	33
ภาพที่ 26 รูปแบบหน่วยย่อยของโครงสร้างรับแรงดึงและการประกอบ.....	34
ภาพที่ 27 การแขวนน้ำหนักที่หุ่นจำลองโครงสร้างรับแรงดึง ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในระบบของโครงข่ายตาตาราง และการวัดระยะด้วยเครื่องมือวัดละเอียด (vernier calipper) เพื่อให้ได้ค่าที่มีความละเอียดสูง.....	35
ภาพที่ 28 การวิเคราะห์แรงกระทำที่หุ่นจำลองในอูโมงค์ลม.....	36
ภาพที่ 29 หนังสือโครงสร้างรับแรงดึง (Zugbeanspruchte Konstruktionen) เล่มที่ 1 (ซ้ายมือ) และเล่มที่ 2 (ขวามือ).....	37
ภาพที่ 30 การผสมระบบโครงสร้างเคเบิลกับระบบอัดอากาศ.....	38
ภาพที่ 31 ระบบโครงสร้างรับแรงดึงชนิดใส่แรงกระทำ.....	39
ภาพที่ 32 แสดงการสลับพฤติกรรมในการรับแรงกระทำของโครงสร้างจากการรับแรงดึง (บน) และการรับแรงอัด (ล่าง) ซึ่งเกิดขึ้นในรูปทรงของโครงสร้างเดิมที่กลับด้านกันเท่านั้น.....	40
ภาพที่ 33 การทดลองโครงสร้างรับแรงดึงของไฟร โอทโท ในโครงการออกแบบหลังคาสนามกีฬาโอลิมปิก ที่เมืองมิวนิค.....	41
ภาพที่ 34 ลักษณะโครงสร้างผ้าใบแบบต่าง ๆ ที่ ไฟร โอทโท ประมวลไว้.....	43
ภาพที่ 35 แบบสถาปัตยกรรมและภาพถ่ายอาคารศาลาเยอรมันที่กรุงเทพมหานคร เมื่อปี ค.ศ.1966.....	44
ภาพที่ 36 เวทีในงานสวนแห่งชาติ เมืองโคโลญจน์ 1957 Tanzbrunnen เป็นเวทีชั่วคราวสำหรับแสดงดนตรีและงานเต้นรำในช่วงฤดูร้อน แม้จะผ่านเวลามานานหลายสิบปี แต่อาคารหลังนี้ก็ยังคงตั้งอยู่ ณ สถานที่นี้ กลายเป็นจุดสังเกตสำคัญหนึ่งของเมืองโคตลญจน์.....	45
ภาพที่ 37 ศาลาเยอรมัน ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ เมืองมอนทรีอัล แคนาดา.....	46
ภาพที่ 38 ศาลาเยอรมัน ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ เมืองมอนทรีอัล แคนาดา.....	47
ภาพที่ 39 ภายในศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีอัล.....	48
ภาพที่ 40 หุ่นจำลองศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีอัล ทำจากฟิล์มสปู.....	49

ภาพที่ 41	ผังหลังคาศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีออล	50
ภาพที่ 42	การทดสอบหุ่นจำลองไม้ในอุโมงค์ลม.....	50
ภาพที่ 43	การสร้างหุ่นจำลองโครงสร้างศาลาเยอรมันสำหรับทดสอบก่อนสร้างจริง	51
ภาพที่ 44	อาคารสถาบันออกแบบโครงสร้างเบาซึ่งสร้างขึ้นจากหุ่นจำลองโครงสร้างศาลาเยอรมัน .	51
ภาพที่ 45	หุ่นจำลองของโครงหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่เมืองมิวนิกและอุปกรณ์การวัดค่า ต่าง ๆ.....	52
ภาพที่ 46	หุ่นจำลองในการประกวดออกแบบโครงหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่เมืองมิวนิก	53
ภาพที่ 47	หลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่เมืองมิวนิก	54
ภาพที่ 48	หุ่นจำลองจากโครงตาข่ายเชือกแขวน (hanging chain model).....	55
ภาพที่ 49	Kieselalge, aus: J.G. Helmcke, W. Krieger, J. Gerloff. Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild © Verlag Bild und Forschung 1962, Berlin	56
ภาพที่ 50	ทีมงานของไฟร โอทโท ร่วมกันทำหุ่นจำลองเชือกแขวน โครงการศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์.....	57
ภาพที่ 51	รูปด้านของหุ่นจำลองศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์	58
ภาพที่ 52	รายละเอียดของหุ่นจำลองศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์.....	58
ภาพที่ 53	โครงการศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์	59
ภาพที่ 54	มุมมองของโครงการศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์.....	60
ภาพที่ 55	ไฟร โอทโท ขณะตรวจงานก่อสร้างศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์	61
ภาพที่ 56	รายละเอียดการประกอบกันของโครงสร้างศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์	61
ภาพที่ 57	ระหว่างการก่อสร้างศาลาญี่ปุ่น เมืองฮันโนเฟอร์ 2000.....	62
ภาพที่ 58	ไฟร โอทโท และ ชิเงรุ บัน.....	63
ภาพที่ 59	ภายในศาลาญี่ปุ่น เมืองฮันโนเฟอร์	63
ภาพที่ 60	หุ่นจำลองเชือกแขวนในการออกแบบโครงการ Stuttgart 21.....	64
ภาพที่ 61	มุมมองของโครงสร้างสถานี Stuttgart 21	65
ภาพที่ 62	โครงสร้างหลักของโครงการ Stuttgart 21	65

ภาพที่ 63 ทศนิยมภาพภายในสถานี Stuttgart 21	66
ภาพที่ 64 หุ่นจำลองแสดงโครงการ Stuttgart 21	67
ภาพที่ 65 สำนักงานออกแบบและสถาบันวิจัยของไฟร โอทโท ที่เบอร์ลิน	68
ภาพที่ 66 ผังพื้นและพื้นที่ทำงานภายในสำนักงาน	69
ภาพที่ 67 Atelier Frei Otto Warmbronn.....	70
ภาพที่ 68 ภาคขยายโครงสร้างไดอะทอมโดย เฮลเมคเคและทีมงาน	71
ภาพที่ 69 รูปแบบของโครงสร้างอัดอากาศ	72
ภาพที่ 70 ผังเมือง Arctic city.....	73
ภาพที่ 71 ไฟร โอทโท กับหุ่นจำลอง Arctic city.....	74
ภาพที่ 72 เอกสารรายงานวิจัยในชุด IL ของไฟร โอทโทและทีมงานที่สถาบันการออกแบบโครงสร้าง เบา.....	75
ภาพที่ 73 ไฟร โอทโท และทีมงานกำลังถ่ายภาพหุ่นจำลองเพื่อนำไปวิเคราะห์.....	81
ภาพที่ 74 ไฟร โอทโทและการทดลองวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหุ่นจำลอง	81
ภาพที่ 75 ไฟร โอทโท ขณะกำลังถ่ายภาพหุ่นจำลอง	82
ภาพที่ 76 ไฟร โอทโท ขณะกำลังเตรียมอุปกรณ์ถ่ายภาพหุ่นจำลอง	82
ภาพที่ 77 แผนภาพแสดงรูปทรงจากการศึกษาบางส่วนของ ไฟร โอทโท	83
ภาพที่ 78 เครื่อง minimum path device.....	84
ภาพที่ 79 ระยะเวลาจัด (minimum path) ที่ไฟร โอทโท และทีมงานทดลองศึกษาด้วยเครื่อง minimum path device	85
ภาพที่ 80 เครื่องสร้างหุ่นจำลองจากฟิล์มสบู่.....	86
ภาพที่ 81 รูปทรงของฟิล์มสบู่ที่ได้จากเครื่องมือ.....	86
ภาพที่ 82 ภาพสเก็ชแนวความคิดของไฟร โอทโท ซึ่งเขียนขึ้นในปี ค.ศ. 1984.....	87
ภาพที่ 83 กราฟฟิกประกอบสมการ BIC.....	88
ภาพที่ 84 ไฟร โอทโท ขณะอธิบายการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหุ่นจำลอง	89

ภาพที่ 85 ผลงานออกแบบโครงสร้างอาคารสูงบางส่วนตามโครงการวิจัย SFB 1224	92
ภาพที่ 86 ผลงานการศึกษาและออกแบบโดยสถาบัน ICD	93
ภาพที่ 87 ICD/ITKE Research Pavilion 2010	95
ภาพที่ 88 การศึกษาเปลือกแข็งของแมลงเพื่อพัฒนาเป็นศาลา Research Pavilion 2014	95
ภาพที่ 89 Research Pavilion 2014	96
ภาพที่ 90 การประสานการใช้เครื่องจักรอัตโนมัติสมัยใหม่สำหรับการเตรียมชิ้นวัสดุและการก่อสร้าง	97
ภาพที่ 91 การสานวัสดุเส้นใยสำหรับการก่อสร้างอาคาร Research Pavilion 2014	97
ภาพที่ 92 ภาพโครงสร้างของรังด้กแด่ของผีเสื้อชนิดหนึ่ง ในการพัฒนา Research Pavilion 201698	
ภาพที่ 93 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงสร้างชนิดต่าง ๆ ตามแนวคิด ของ สมการ BIC.....	101
ภาพที่ 94 การทดลองหารูปร่างของระยะขจัด โดยใช้เส้นด้ายพันเป็นระบบหลัก จากนั้นทดลองปล่อยให้ น้ำไหลลงไปบนกลุ่มเส้นด้าย ทำให้เกิดระยะทางและรูปร่างซึ่งก่อรูปขึ้นตามการกระทำของน้ำ	104
ภาพที่ 95 การทดลองกระบวนการก่อรูปทรงของฟิล์มสบู่.....	105
ภาพที่ 96 ภาพขยายแสดงโครงสร้างสิ่งมีชีวิต โดยแฮร์เทล	106
ภาพที่ 97 การศึกษาการกระพือปีกของนกเพื่อพัฒนางานวิศวกรรมอากาศยาน.....	106
ภาพที่ 98 การศึกษาการสับทิศทางของปลาเพื่อทำให้เกิดแรงและการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้งไปใน ทิศทางด้านหน้า	107
ภาพที่ 99 แฮร์เทล ขณะทำการทดลองเพื่อพัฒนางานวิศวกรรมอากาศยาน ณ มหาวิทยาลัยเทคนิค เบอร์ลิน.....	107
ภาพที่ 100 การออกแบบหลังคาที่สามารถเปิด-ปิดได้.....	108
ภาพที่ 101 การศึกษากระบวนการเปลี่ยนรูปจากระนาบไปสู่เส้น และจากเส้นสู่ระนาบ.....	110
ภาพที่ 102 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานตามระยะช่วงพาดต่าง ๆ	112

ภาพที่ 103 หุ่นจำลองกายภาพ (physical model) ซึ่งโอทโทใช้เป็นเครื่องมือในการทดลอง
กระบวนการก่อรูปทรงของเขา ถูกจัดแสดง ณ มหาวิทยาลัย คาร์ลสรูธ เมื่อปี ค.ศ.2017..... 113

ภาพที่ 104 ไฟร โอทโท (ยืน ซ้ายสุด) ขณะทดลองออกแบบอาคาร Ökohauser ร่วมกับนักศึกษา ในปี
ค.ศ.1987 ซึ่งมุ่งนำเสนออาคารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ด้วยการใช่วัสดุที่น้อยและเกิดประโยชน์
สูงสุด..... 115

ภาพที่ 105 โครงการต่อเติมพิพิธภัณฑสถานศิลปะชตุท์การ์ท ออกแบบโดยเจมส์ สเตอร์ลิงก์..... 117

ภาพที่ 106 แสดงการวิเคราะห์รูปทรงทางสถาปัตยกรรมของมนุษย์ในยุคโบราณโดยไฟร โอทโท ซึ่ง
ต้องอาศัยคุณสมบัติของวัสดุในการประกอบกันขึ้นเป็นรูปทรง..... 120

ภาพที่ 107 ภาพร่างแสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของกระบวนการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งวิวัฒน์
ตัวเองจนกลายเป็นรูปทรงต่างๆกัน เขียนโดยไฟร โอทโท เมื่อปี ค.ศ.1981 121

ภาพที่ 108 สนามราเลก์ อารีน่า ที่ นอร์ธ แคโรไลน่า สหรัฐอเมริกา..... 123

ภาพที่ 109 ปกงานดุชฎินินท์เรื่องโครงสร้างหลังคารับแรงดึง โดยไฟร โอทโท 123

ภาพที่ 110 จดหมายและภาพร่างแนวคิดในการออกแบบโครงการเวสต์เทรค เซ็นเตอร์ แห่งใหม่ ถึง
มักซ์ โพรเทค..... 127

ภาพที่ 111 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบรูปทรงของโครงสร้าง
ICD-ITKE research 2012 มหาวิทยาลัยชตุท์การ์ท ซึ่งเป็นการสร้างความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร
หลายตัวแปร เช่น วัสดุก่อสร้าง กระบวนการก่อสร้าง รูปทรงและโครงสร้างต้นแบบจากเปลือกของ
แมลงเปลือกแข็ง ฯลฯ..... 132

ภาพที่ 112 ไฟร โอทโท ขณะสร้างและทดลองหุ่นจำลองโครงสร้างหลังคารับแรงดึง ในยุคสมัยที่ยังไม่
มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วย การวิเคราะห์แรงกระทำจึงต้องมีการคิดและหาวิธีการ โดยโอทโทแบ่งพื้นที่
ผิวออกเป็นตารางหน่วยย่อยขนาดเล็ก เพื่อสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ แล้วจึง
นำไปสู่การคำนวณทางวิศวกรรม..... 134

ภาพที่ 113 รูปทรงซึ่งเกิดจากการศึกษาและทดลองของไฟร โอทโท 136

ภาพที่ 114 เคนโซะ จังเงะ กับการออกแบบเมืองโตเกียวซึ่งขยายตัวลงไปในทะเล ตามแนวคิด
metabolism เมื่อปี ค.ศ. 1960..... 137

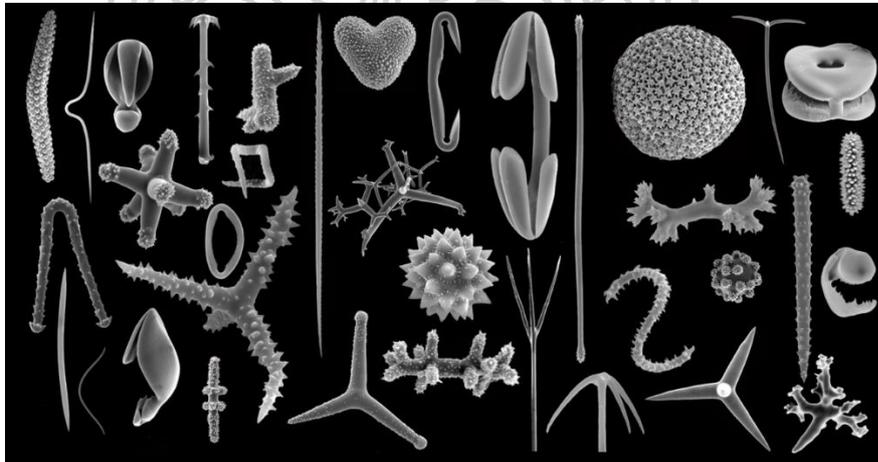
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ธรรมชาติ ถูกใช้เป็นแรงบันดาลใจ และสร้างแนวความคิดในการออกแบบมาช้านาน โดยเฉพาะกับการออกแบบสถาปัตยกรรม ซึ่งมีการอ้างอิงรูปลักษณะของสิ่งต่างๆในธรรมชาติเป็นส่วนประกอบของสถาปัตยกรรมอยู่เสมอ เช่น ในสถาปัตยกรรมกรีก มีการประยุกต์เอารูปร่างของเปลือกหอยมาใช้เป็นหัวเสาไอออนิก (Ionic) หรือการนำเอารูปลักษณะของต้นไม้ใบไม้มาใช้กับหัวเสาคอรินเธียน (Corinthian) เป็นต้น

ในสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ เราพบแนวคิดการใช้ธรรมชาติเพื่อเป็นแรงบันดาลใจในการสร้างสรรค์งานสถาปัตยกรรมเช่นกัน ดังวลีอมตะของ เฮนรี หลุยส์ ซัลลิแวน (Henry Louis Sullivan) ที่ว่า “รูปทรงเป็นไปตามประโยชน์ใช้สอย” (Form follows function) ซึ่งมีนัยยะถึงความสมบูรณ์ของระบบสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติอันประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่มีความจำเป็นเชิงประโยชน์ใช้สอยที่เหมาะสม โดยไม่มีส่วนเกิน (Louis Sullivan, 1885: 58-59) และต่อมาได้ถูกพัฒนาเป็นชีวสถาปัตยกรรม (organic architecture) โดยแฟรงค์ ลอยด์ ไรท์ (Frank Lloyd Wright)



ภาพที่ 1 รูปทรงของโครงสร้างในฟองน้ำและปะการังชนิดต่างๆ

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/On_Growth_and_Form#/media/](https://en.wikipedia.org/wiki/On_Growth_and_Form#/media/File:Demospongiae_spicule_diversity.png)

File:Demospongiae_spicule_diversity.png

แนวคิดเรื่องธรรมชาติซึ่งถูกนำมากล่าวถึงในฐานะเป็นเครื่องมือในการออกแบบนี้ถูกพิจารณาในลักษณะเป็นวิทยาศาสตร์โดยนักคณิตศาสตร์และนักชีววิทยาชาวสก็อตแลนด์ ชื่อ ดี อาร์คิ

เวนท์เวิร์ธ ธอมป์สัน (D'Archy Wentworth Thompson) ในหนังสือชื่อ “ว่าด้วยการเจริญเติบโต และรูปร่าง” (On growth and form) ซึ่งตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1917 และปรับปรุงในการตีพิมพ์ ครั้งที่ 2 เมื่อปี ค.ศ.1942 เป็นเอกสารที่กล่าวถึงสัดส่วนและรูปร่างที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจาก กระบวนการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ โดย ดี อาร์คี ได้ใช้เรขาคณิตเป็นเครื่องมือศึกษา การแปรเปลี่ยนของรูปร่างในแต่ละช่วงเวลาของพัฒนาการในการเติบโตของสิ่งมีชีวิต และงานเขียน ชิ้นนี้ได้กลายเป็นเครื่องมือของนักออกแบบในกลุ่มประเทศยุโรปนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้าง แนวความคิดในการออกแบบซึ่งเกี่ยวเนื่องกับธรรมชาติต่อมาอีกมากมาย

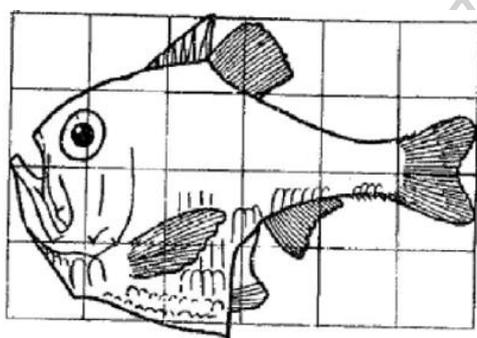


Fig. 146. *Argyropelecus olfersi*.

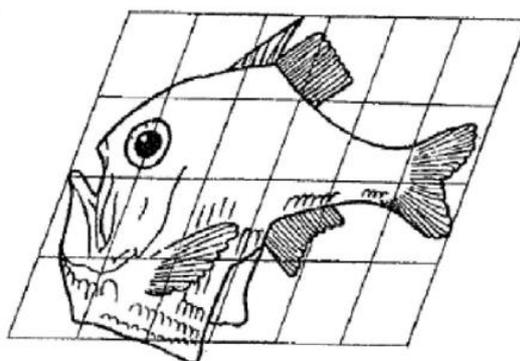


Fig. 147. *Sternoptyx diaphana*.

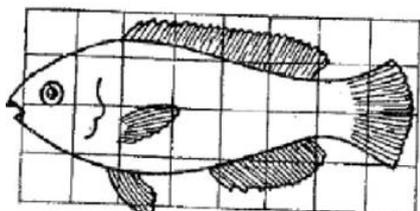


Fig. 148. *Scarus* sp.

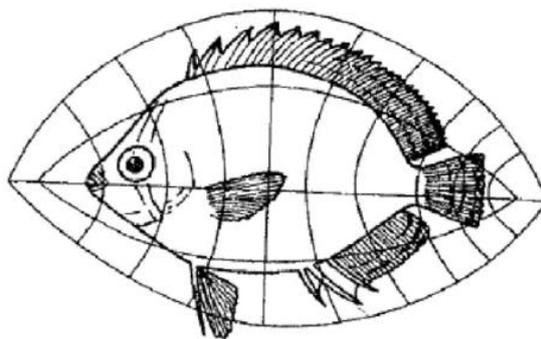


Fig. 149. *Pomacanthus*.

ภาพที่ 2 Transformation between *Argyropelecus* and *Sternoptyx* and *Scarus* sp. and *Pomacanthus* แสดงการศึกษาเปรียบเทียบรูปร่างของปลาสายพันธุ์ต่างๆ ซึ่งธอมป์สันได้แสดงการ วิเคราะห์รูปร่างของปลาผ่านระบบตาตารางที่มีหลากหลายรูปแบบ

ที่มา: D'Archy Thompson, 1942: 1062

สถาปนิก วิศวกร นักออกแบบ ที่ได้รับอิทธิพลแนวคิดเรื่องธรรมชาติและนำมาปรับใช้ใน งานออกแบบนั้นมีมากมาย สถาปนิกชาวเยอรมัน ฟรี เพาวล์ โอทโท (Frei Paul Otto) หรือ ฟรี

โธโท เป็นสถาปนิกผู้หนึ่งที่เป็นที่รู้จักในฐานะเป็นผู้ที่ศึกษา ทดลอง ค้นหารูปทรงทางสถาปัตยกรรมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ

ไฟร โธโท เป็นสถาปนิกสำคัญที่มีชื่อเสียงมากคนหนึ่งในช่วงศตวรรษที่ 20 เพราะเป็นผู้บุกเบิกวิธีการออกแบบรูปทรงแบบใหม่ คือ สถาปัตยกรรมรับแรงดึงหรือโครงสร้างรับแรงดึงซึ่งมีความเชื่อมโยงกับรูปทรงในธรรมชาติ และได้สร้างผลงานที่มีชื่อเสียงเป็นที่จดจำมากมาย เช่น ศาลาเยอรมัน (German Pavilion) ที่มอนทรีออล (Montreal) เมื่อปี ค.ศ.1967 หลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิก ที่เมืองมิวนิก เมื่อปี ค.ศ.1972 รวมถึงผลงานออกแบบอาคารสาธารณะอื่น ๆ อีกมากมาย ส่งผลให้เขาได้รับรางวัลสำคัญในฐานะสถาปนิกมากมาย เช่น

ปี ค.ศ.1974 ได้รับรางวัล Thomas Jefferson Medal in Architecture

ปี ค.ศ.1980 ได้รับรางวัล Honorary doctorate of science from the University of Bath

ปี ค.ศ.1996/97 ได้รับรางวัล Wolf Prize in Architecture

ปี ค.ศ.2005 ได้รับรางวัล Royal Gold Medal for architecture by RIBA

ปี ค.ศ.2006 ได้รับรางวัล Praemium Imperiale in Architecture

และในปี ค.ศ.2015 ได้รับรางวัล Pritzker Architecture Prize

เป็นที่สังเกตได้ว่า ช่วงทศวรรษที่ 1970-1990 นั้น เป็นช่วงเวลาไฟร โธโท กลายเป็นบุคคลสำคัญคนหนึ่งในวงการออกแบบสถาปัตยกรรมระดับโลก และกลับมาเป็นกระแสในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในช่วงปี ค.ศ.2015 เมื่อเขาได้รับรางวัลใหญ่สำหรับอาชีพสถาปนิก เนื่องจากไฟร โธโท ได้เสียชีวิตลงในวันที่ 9 มีนาคม ค.ศ.2015 ซึ่งเป็นปีที่ได้รับรางวัล Pritzker Architecture Prize นั้นเอง การทำงานออกแบบและงานค้นคว้าวิจัยของเขาจึงได้ขาดช่วงลง



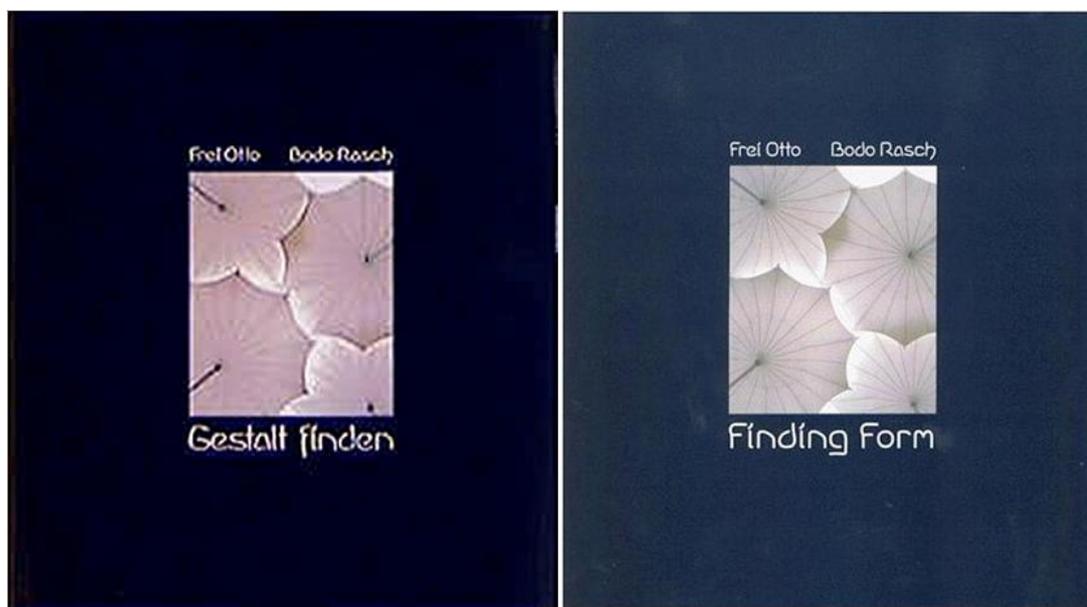
ภาพที่ 3 ไฟรี โอทโท (Frei Otto) ขณะที่กำลังตรวจงานก่อสร้างโครงการ German pavilion ซึ่งจัดขึ้น ณ เมืองมอนทรีออล ประเทศแคนาดา เมื่อปี ค.ศ. 1967 โครงการนี้นับว่าเป็นผลงานสถาปัตยกรรมที่มีขนาดใหญ่และเป็นผลงานระดับนานาชาติผลงานแรกของไฟรี โอทโท
ที่มา: www.lemonteur.fr

1.2 ปัญหาเรื่องรูปทรงของไฟรี โอทโท

ในปี ค.ศ.1992 โอทโท ได้รับรางวัล Deutscher Werkbund winning prize ซึ่งเป็นรางวัลเกียรติยศสูงสุดจากสมาพันธ์แรงงานเยอรมัน (Deutscher Werkbund) อันเป็นองค์กรเก่าแก่ที่ก่อตั้งมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1907 โดยมีวัตถุประสงค์ในการผสมผสานการออกแบบและกระบวนการผลิตวัสดุในระบบอุตสาหกรรมเข้าด้วยกัน อันจะเป็นการช่วยส่งเสริมความเข้มแข็งของเศรษฐกิจและการสร้างองค์ความรู้ในระดับชาติ

ในโอกาสประกาศรางวัล Deutscher Werkbund winning prize ทางสมาพันธ์ฯ ได้จัดให้มีการจัดแสดงนิทรรศการผลงานของโอทโทด้วย โดยใช้ชื่อว่า “Gestalt finden: Auf dem Weg zu

einer Baukunst des Minimalen” และมีการตีพิมพ์หนังสือรวบรวมแนวคิดและผลงานในชื่อเดียวกันนั้น สำหรับภาคภาษาอังกฤษใช้ชื่อว่า “Form finding: Towards an architecture of the minimal” ซึ่งได้กลายเป็นสื่อที่เผยแพร่แนวคิดและผลงานของโอทโทให้เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง



ภาพที่ 4 หนังสือรวบรวมผลงานและแนวคิดของฟรี โอทโท ซึ่งจัดพิมพ์ขึ้นเนื่องจากการประกาศรางวัล Deutscher Werkbund winning prize ฉบับภาษาเยอรมัน (ซ้าย) และฉบับแปลเป็นภาษาอังกฤษ (ขวา)

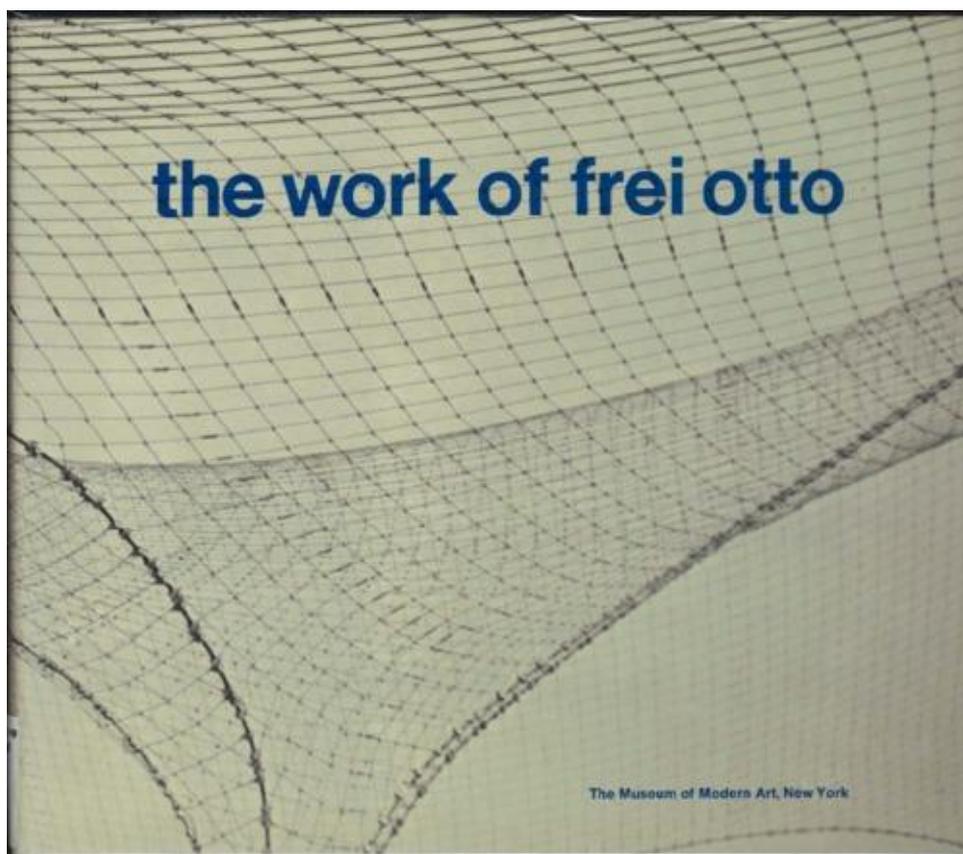
อย่างไรก็ดี หนังสือเล่มดังกล่าวถูกจัดทำขึ้นโดยศิษย์คนสนิทของโอทโท โดยฟรี โอทโทเอง ได้มีส่วนเขียนเฉพาะส่วนบทนำเท่านั้น นอกจากหนังสือ “Form finding: Towards an architecture of the minimal” ดังได้กล่าวมาแล้ว ยังมีหนังสือรวบรวมผลงานของโอทโทอีกหลายเล่ม ที่ถูกรวบรวมขึ้นโดยผู้ใกล้ชิดกับโอทโทเอง หรือแม้แต่ผู้ที่มีความสนใจในผลงานของเขา เช่น หนังสือรวมผลงานของฟรี โอทโท โดย คอนราด โรแลนด์ (Conrad Roland, 1970) ลุดวิก เกลเซอร์ (Ludwig Glaser, 1972) ฟิลลิป ดรูว์ (Phillip Drew, 1976) หรือผลงานการขยายความคิดเรื่องของระบบของธรรมชาติซึ่งก่อให้เกิดรูปร่างของผังเมือง (Berthold Burkhardt, 2011) เป็นต้น

เมื่อได้ศึกษาเอกสารดังกล่าวเบื้องต้น ผู้วิจัยพบว่า เอกสารดังกล่าวมักเป็นเพียงการรวบรวมผลงาน การให้ข้อมูลในเชิงเทคนิคของการก่อสร้างเป็นส่วนใหญ่ แต่ตัวแก่นปรัชญาแนวคิดหลักของฟรี โอทโท นั้น มักไม่ปรากฏชัดเจน ไม่สามารถเข้าใจระบบและวิธีคิดได้ จึงนำมาสู่ความเข้าใจอย่างผิวเผินผ่านผลงานการออกแบบที่มีรูปทรงแปลกตา ผู้อ่านไม่สามารถนำไปต่อยอดความคิด หรือวิธีการออกแบบใหม่ๆต่อไปได้

ข้อสังเกตหนึ่งของผู้วิจัยคือ การใช้คำแปลจากภาษาเยอรมัน จากคำว่า Gestalt เป็นภาษาอังกฤษว่า Form นั้น ก่อความสงสัยแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง จริงอยู่ว่าในหนังสือเล่มดังกล่าวข้างต้นนี้ จะมีรูปทรง หรือ form เป็นส่วนที่เด่นชัดของเนื้อหา แต่คำว่า Form ในภาษาเยอรมัน ซึ่งสามารถแปลความได้ตรงตัวกับคำว่า form ในภาษาอังกฤษนั้นมีอยู่ แต่หนังสือรวบรวมผลงานสำหรับงานจัดแสดงนี้ กลับเลือกใช้คำว่า Gestalt แทน ผู้วิจัยจึงไม่ปักใจเชื่อความหมายที่โอทโทจะสื่อโดยนัยยะของ รูปทรง ตรงๆ เนื่องจากมีความไม่ลงรอยกันอย่างแนบสนิทได้จริง และจะกลายเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การศึกษาแนวทางการออกแบบของไฟร โอทโท และการประยุกต์ใช้แนวทางการออกแบบโครงสร้างเบา นั้นเกิดความผิดพลาดคลาดเคลื่อนไปได้อย่างมีนัยยะสำคัญ¹



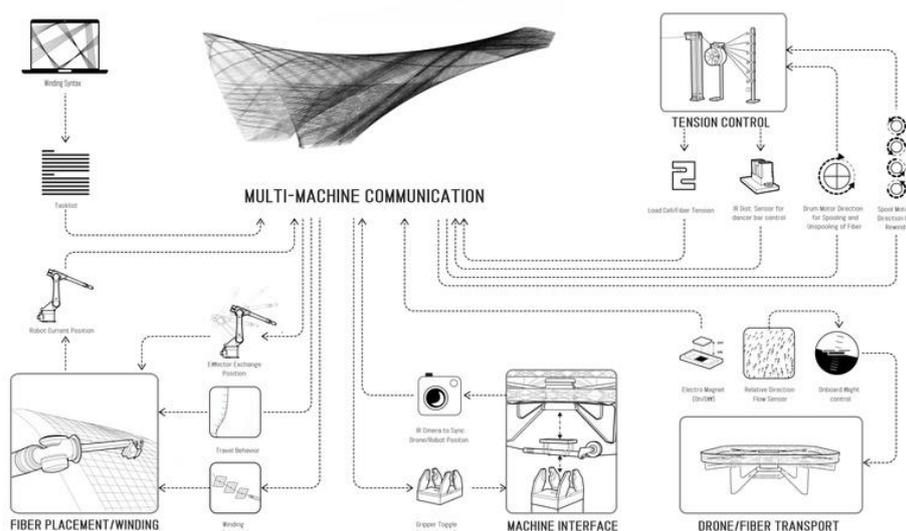
¹ จากพจนานุกรมภาษาเยอรมัน-ภาษาอังกฤษของเคมบริดจ์ (Cambridge dictionary) ได้ให้คำแปล gestalt จากภาษาเยอรมัน เป็นภาษาอังกฤษว่า build, semblance, figure, form, frame, shape และได้ให้คำแปล form จากภาษาเยอรมัน เป็นภาษาอังกฤษว่า form, mold (ที่มา: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/german-english/gestalt> และ <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/german-english/form>)



ภาพที่ 5 หนังสือรวบรวมผลงานของฟรี โอทโท ในการแสดงนิทรรศการของเขาที่ the Museum of Modern Art นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ.1971 เป็นหนังสือที่นำเสนอผลงานการออกแบบของเขาออกเป็นหมวดหมู่ของลักษณะโครงสร้าง ซึ่งแม้จะทำให้ผลงานของเขาได้เป็นที่รู้จักในวงกว้าง แต่ก็ขาดรายละเอียดเชิงลึกในด้านแนวความคิด

อีกส่วนหนึ่งที่อาจก่อให้เกิดความสับสนสำหรับสถาปนิกและผู้สนใจศึกษาเรื่องเกี่ยวกับแนวคิดของฟรี โอทโท คือ การแตกกลุ่มของลูกศิษย์และผู้พัฒนาต่อยอดความคิดของโอทโทภายหลังจากที่โอทโทยุติบทบาทการเป็นผู้อำนวยการสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา มหาวิทยาลัยชตุทท์การ์ท เมื่อปี ค.ศ.1991 เป็นต้นมา ทำให้เกิดสถาบันวิจัยใหม่ของมหาวิทยาลัยชตุทท์การ์ทที่มีการนำเอาเทคโนโลยีใหม่มาช่วยในการพัฒนางาน เช่น กลุ่มผู้สนใจประเด็นในเชิงการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร นำโดย แวร์เนอร์ โซเบ็ค (Werner Sobek) ผู้อำนวยการสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาและการก่อสร้าง (Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, ILEK) ซึ่งรับช่วงต่อในตำแหน่งผู้อำนวยการสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา (Institut für Leichte Flächentragwerke, IL) ต่อจากโอทโท กลุ่มที่นำเอาเทคโนโลยีดิจิทัลผ่านซอฟต์แวร์และคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบ นำโดย อาคิม เมงเงส (Achim Menges) ผู้อำนวยการสถาบันคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบและก่อสร้าง (Institute for Computational Design and Construction, ICD) และกลุ่มที่สนใจการ

พัฒนาโครงสร้างจากกายภาพของโครงสร้างสิ่งมีชีวิต นำโดย ยาร์ห์น คนิพเพอร์ส (Jahn Knippers) ผู้อำนวยการสถาบันการก่อสร้างและการออกแบบโครงสร้าง (Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, ITKE) เป็นต้น



ภาพที่ 6 การออกแบบและก่อสร้าง ICD-ITKE research pavilion ซึ่งเป็นการร่วมมือกันของสถาบัน ICD และ ITKE มีการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการสร้างหุ่นจำลอง โครงสร้างและการวิเคราะห์โครงสร้าง การใช้เทคโนโลยีวัสดุ การก่อสร้างโดยการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ แทนมนุษย์ เป็นต้น องค์ประกอบใหม่ในการออกแบบและก่อสร้างซึ่งมีความแตกต่างจากยุคสมัยของไฟร โอทโท เหล่านี้ เป็นส่วนหนึ่งในการทำให้การทำความเข้าใจแนวคิดของโอทโทเกิดความสับสนได้ ที่มา: <https://somepeople.studio/ICD-ITKE-2016-2017>

แม้ทั้งสามกลุ่มนี้จะตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยชตุทการ์ท (Stuttgart university) อันเป็นที่ตั้งของสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของโอทโทแต่เดิม ทั้งยังเป็นลูกศิษย์และผู้ใกล้ชิดหรือผู้ศึกษาตามแนวทางของโอทโททั้งสิ้นก็ตาม แต่ทั้งสามกลุ่มความคิดนี้ต่างมุ่งศึกษาพัฒนาการออกแบบตามแนวคิดของตนเองอย่างแข็งขันโดยอาศัยพื้นฐานจากสิ่งที่โอทโทได้ศึกษามาก่อน โดยพยายามเจาะลึกลงไปรายละเอียดอันเป็นความสนใจเฉพาะ ซึ่งกลุ่มเองก็ได้ผลิตนักคิด นักออกแบบรุ่นใหม่ ๆ อีกเป็นจำนวนมาก ทำให้การศึกษาเชิงลึกของสถาบันเหล่านี้มีการพัฒนาต่อยอดจากแนวทางเดิมของไฟร โอทโทไป และเริ่มมีความเฉพาะทางที่เด่นชัดมากขึ้น สำหรับผู้สนใจศึกษาที่ไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลพื้นฐานความคิดเดิมของไฟร โอทโท อาจเกิดความเข้าใจผิดพลาดคลาดเคลื่อนในประเด็นต่างๆได้

1.5 วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาเชิงคุณภาพ เพื่อแยกแยะ เรียบเรียง และสร้างความเข้าใจในกระบวนการสร้างสรรค์ผลงานของไฟร โอทโท การศึกษาแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ คือ การศึกษาจากเอกสาร และการศึกษาจากอาคารตัวอย่าง

สำหรับการศึกษาจากเอกสาร แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 วรรณกรรมขั้นต้นซึ่งเขียนขึ้นโดยไฟร โอทโทเอง ในช่วงปี ค.ศ.1951 ถึง ค.ศ.1992 โดยมักเป็นเอกสารภาษาเยอรมัน กลุ่มที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับไฟร โอทโท และการออกแบบของเขา ซึ่งถูกเขียนขึ้นโดยบุคคลอื่น และกลุ่มที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฟร โอทโท งานออกแบบของไฟร โอทโท และการประยุกต์ใช้ความรู้ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยให้ความสำคัญกับเอกสารขั้นต้นในกลุ่มที่ 1 มากที่สุด สำหรับเอกสารในกลุ่มที่ 2 และ 3 นั้น ใช้ศึกษาเพื่อเป็นส่วนประกอบ

ในส่วนของอาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ เป็นงานออกแบบของไฟร โอทโท ทั้งที่ทำด้วยตนเองคนเดียว และงานที่ทำร่วมกับบุคคลอื่น โดยศึกษางานออกแบบที่มีความโดดเด่น เป็นที่รู้จักในระดับนานาชาติ เพื่อใช้ศึกษาในประเด็นเรื่องความสัมพันธ์ของแนวคิดและกระบวนการในการออกแบบกับงานออกแบบและก่อสร้างจริง รวมถึงงานออกแบบอื่นๆที่ถูกทดลอง หรืออยู่ในขั้นแนวความคิดด้วย

1.6 สมมติฐานของการวิจัย

แนวคิดและวิธีการในการออกแบบของไฟร โอทโทนั้นมีระบบระเบียบ แต่ยังคงขาดการศึกษาเชิงลึกเพื่อสรุปความ และนำไปใช้ประโยชน์ในการปฏิบัติวิชาชีพและการศึกษาสถาปัตยกรรม โดยเฉพาะในแง่ของการบูรณาการวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์เข้าด้วยกัน

รูปทรง (form) ในความหมายของไฟร โอทโท นั้น มีความเฉพาะ มากกว่าความหมายของการเป็นรูปทรงสามมิติโดยทั่วไป แต่มีความหมายซ่อนในลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการรวมกันของระบบย่อย หรือองค์ประกอบย่อยผ่านกระบวนการบางประการ จนกลายเป็น รูปทรง ในความหมายของ gestalt ในภาษาเยอรมัน

1.7 ขอบเขตของการวิจัย

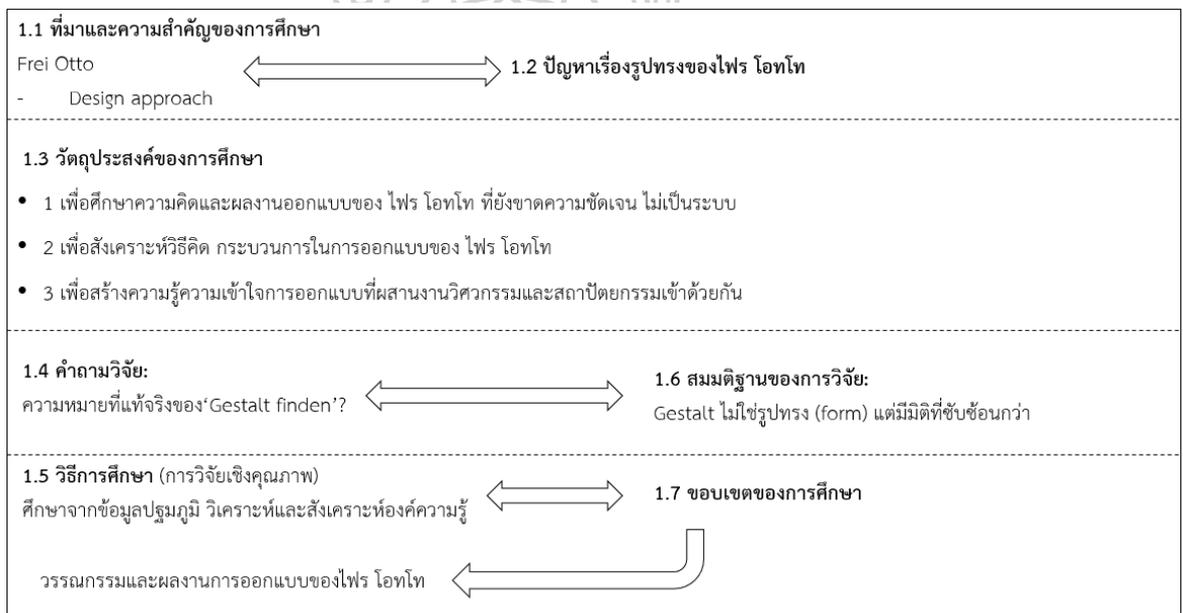
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเรื่องแนวคิด วิธีการ และกระบวนการในการออกแบบของไฟร โอทโท โดยศึกษาผ่านวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และผลงานการออกแบบของไฟร โอทโท รวมถึงผลงานที่ไฟร โอทโท ได้ปฏิบัติร่วมกับบุคคลอื่นด้วย

1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.7.1 Gestalt finden (เยอรมัน), Form finding (อังกฤษ) หมายถึง ปรัชญาการออกแบบของ ไพร์ โอทโท อันเกี่ยวเนื่องกับแนวคิดเบื้องต้น กระบวนการออกแบบและการทดลอง เรื่องการสร้างรูปทรง

1.7.2 Natürliche Konstruktionen (เยอรมัน), Natural construction (อังกฤษ) หมายถึง รูปแบบของธรรมชาติที่ไพร์ โอทโทใช้ในการศึกษาและพัฒนากระบวนการออกแบบ และวิธีการก่อสร้าง

ตารางที่ 1 กรอบความคิดในการศึกษา



บทที่ 2

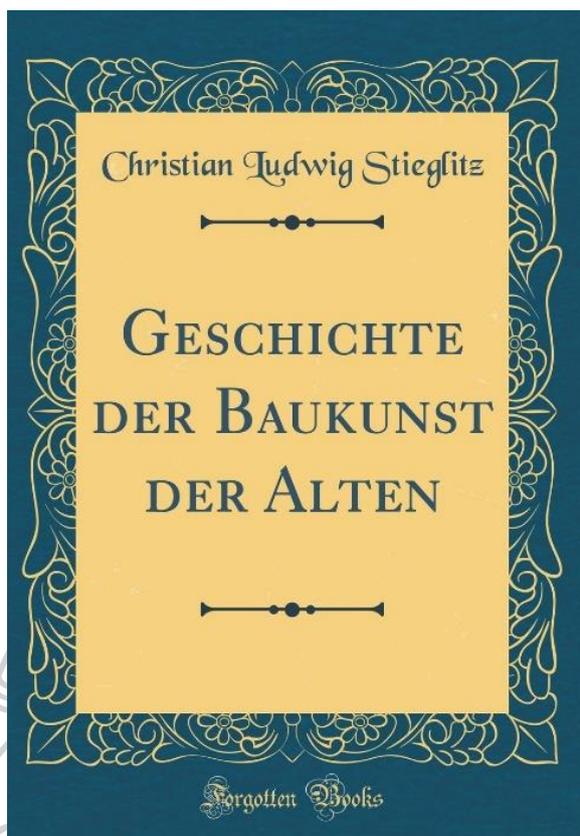
ไฟร โอทโท

2.1 พัฒนาการของการศึกษาและการปฏิบัติวิชาชีพสถาปัตยกรรมในเยอรมนี

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในมิติทางด้านประวัติศาสตร์ที่ส่งอิทธิพลต่อแนวคิดและการทำงานของไฟร โอทโท จึงควรพิจารณาบริบทแวดล้อมในประเด็นทิศทางการศึกษาสถาปัตยกรรม และการปฏิบัติวิชาชีพสถาปัตยกรรมในเยอรมนีในช่วงศตวรรษที่ 19 และต้นศตวรรษที่ 20 ซึ่งเป็นช่วงเวลาในการศึกษาและเริ่มต้นปฏิบัติวิชาชีพของโอทโทเป็นส่วนประกอบด้วย ในส่วนนี้ผู้ศึกษาจึงค้นคว้าข้อมูลในเชิงบริบททางการศึกษาและปฏิบัติวิชาชีพสถาปัตยกรรมในเยอรมนีในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อเป็นส่วนประกอบในการทำความเข้าใจปัจจัยหรืออิทธิพลต่างๆที่อาจส่งผลกระทบต่อแนวคิดในการออกแบบของไฟร โอทโท

2.1.1 พัฒนาการทางการศึกษาสถาปัตยกรรมในเยอรมนี

แม้ว่าการสร้างสรรค์งานสถาปัตยกรรมในดินแดนอาณาจักรปรัสเซีย หรือบริเวณประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีในปัจจุบันนั้นจะมีมาช้านานแล้ว ในต้นศตวรรษที่ 19 มีสถาปนิกและนักทฤษฎีสำคัญหลายคน เช่น โยฮันน์ โยคิม วิงเคลมานน์ (Johann Joachim Winckelmann) คาร์ล ฟรีดริช ชิงเคล (Karl Friedrich Schinkel) หรือ คาร์ล เบททิชเชอร์ (Carl Bötticher) รวมถึง โกทท์ฟรีด เซมเปอร์ (Gottfried Semper) ซึ่งเป็นนักทฤษฎีสถาปัตยกรรมที่ได้วางรากฐานให้กับวงการสถาปัตยกรรมในเยอรมนี (Harry Francis Mallgrave and David Goodman, 2011: 70-74) สำหรับระบบการศึกษาสถาปัตยกรรมนั้น เริ่มมีรูปแบบชัดเจนในราวต้นศตวรรษที่ 19 โดยคริสเตียน ลูดวิก ชติกลิทซ์ (Christian Ludwig Stieglitz) นักประวัติศาสตร์และทฤษฎีสถาปัตยกรรมชาวไลพ์ซิก (Leipzig) ได้เรียบเรียงตำราทางสถาปัตยกรรมขึ้นในปี ค.ศ. 1792 โดยตีพิมพ์หนังสือชื่อ ประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรมโบราณ (Geschichte der Baukunst der Alten) ซึ่งอ้างอิงจากรูปแบบสถาปัตยกรรมคลาสสิก อันกล่าวได้ว่าได้รับอิทธิพลจากงานเขียนของสถาปนิกคนสำคัญในยุคก่อนหน้า คือจากหนังสือเรื่อง ว่าด้วยต้นแบบสถาปัตยกรรมกรีก (Gedanken über die Nachahmung der Griechen) ของ วิงเคลมานน์ ซึ่งตีพิมพ์เผยแพร่มาก่อนในช่วงปี ค.ศ. 1755 อย่างไรก็ตามหนังสือของชติกลิทซ์นั้น ได้ผูกโยงเอารูปแบบสถาปัตยกรรมโกธิคเข้ามาเป็นรูปแบบสถาปัตยกรรมของชาวเยอรมัน (Hanno-Walter Krufft, 1994: 290-322)



ภาพที่ 7 ประวัติศาสตร์สถาปัตยกรรมโบราณ (Geschichte der Baukunst der Alten) โดย โดยคริสเตียน ลุดวิก ชติกลิทซ์ (Christian Ludwig Stieglitz)
ที่มา: www.amazon.com

ดาวิด กิลลี (David Gilly) เป็นสถาปนิกที่มีความสนใจในเรื่องเทคนิคของการก่อสร้างมากเป็นพิเศษ และเขายังเป็นอาจารย์คนสำคัญผู้ร่วมก่อตั้งของสถาบันสถาปัตยกรรม (Bauakademie) ในเบอร์ลิน ซึ่งเป็นสถาบันที่สอนการออกแบบสถาปัตยกรรมแห่งแรกของเยอรมนี ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1799 และเพื่อให้เกิดความแตกต่างจากแนวทางการศึกษาสถาปัตยกรรมของสถาบันโบซาร์ (Ecole des Beaux-Arts) ซึ่งเป็นผู้นำเรื่องการศึกษาสถาปัตยกรรมในฝรั่งเศสขณะนั้น กิลลีจึงเลือกใช้แนวทางแบบสถาบันโพลีเทคนิคในปารีส (Ecole Polytechnique in Paris) เป็นต้นแบบในการสร้างหลักสูตร ซึ่งก็ตรงกับความสนใจของตนเองด้วย ดังนั้น ตำราต่างๆที่ถูกเขียนขึ้นโดยคณาจารย์ชาวเยอรมันจึงเน้นหนักไปในทางเทคนิคมากกว่าแนวประวัติศาสตร์และทฤษฎีการออกแบบ เพื่อผลิตสถาปนิกให้กับหน่วยงานราชการต่างๆในอาณาจักรปรัสเซีย นั่นเองเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดการสร้างหลักสูตรและมาตรฐานในการปฏิบัติงานทั่วทั้งภูมิภาคอย่างขนานใหญ่



ภาพที่ 8 อาคารสถาบันสถาปัตยกรรม Bauakademie ภาพวาดโดย Eduard Gärtner, 1868

ที่มา: <https://en.wikipedia.org/>

อาเธอร์ โชเพินฮาว (Arthur Schopenhauer) เองก็มีส่วนที่สนับสนุนแนวคิดดังกล่าว เขาเชื่อว่าสถาปัตยกรรมนั้นควรแสดงออกถึงกฎของแรงโน้มถ่วง โดยเสนอว่าควรให้ความสำคัญกับกฎทางฟิสิกส์ แรงโน้มถ่วง การเชื่อมประสานกันขององค์ประกอบต่างๆทางโครงสร้าง ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้สถาปัตยกรรมนั้นสามารถก่อรูปและดำรงรูปทรงอยู่ได้ และทำให้สถาปัตยกรรมนั้นเกิดคุณค่าในทางวิจิตรศิลป์ (ibid.)

ฟรานซ์ คูกเลอร์ (Franz Kugler) และ คาร์ล ชนาเซ (Karl Schnaase) ซึ่งเป็นลูกศิษย์รุ่นแรก ๆ ของ ยาโคบ บวร์กฮาร์ดท์ (Jacob Burkhardt) ที่สถาบันสถาปัตยกรรมเบอร์ลิน ซึ่งต่อมาได้เป็นสถาปนิกและนักทฤษฎีสถาปัตยกรรม คูกเลอร์ได้เขียนหนังสือ คู่มือประวัติศาสตร์ศิลปะ (Handbuch der Kunstgeschichte) ขึ้น ในปี ค.ศ.1842 เสนอแนวคิดที่สอดคล้องกับโชเพินฮาว ในงานเขียนของคูกเลอร์นั้น มีการกำหนดใช้คำว่า organic ขึ้น และได้กล่าวถึงกระบวนการวิวัฒนาการของชีวิต ซึ่งเขาเห็นว่าเป็นส่วนสำคัญของการสร้างสถาปัตยกรรม และยังได้ตีพิมพ์หนังสือเล่มเล็ก (pamphlet) ชื่อ ว่าด้วยชีวะในสถาปัตยกรรม (Über das Organische in der Baukunst) ซึ่ง

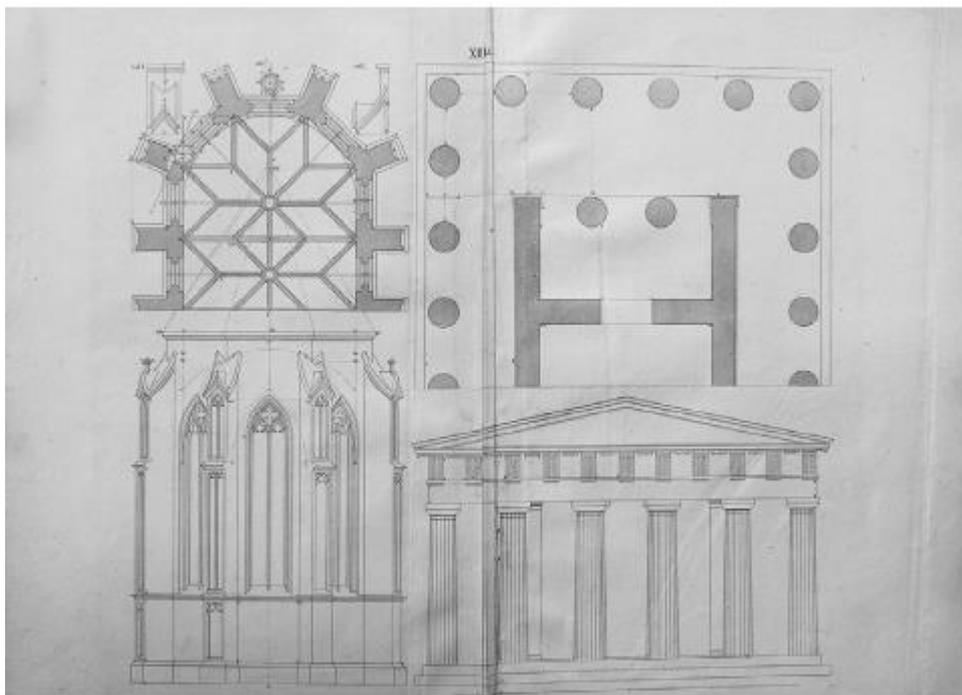
ตีพิมพ์ในปี ค.ศ.1844 มีเนื้อหาเสนอความสัมพันธ์ของสิ่งมีชีวิตกับสถาปัตยกรรมทั้งในระดับระบบภายในและรูปร่างภายนอกที่ปรากฏ ซึ่งนั่นทำให้การประดับประดาตกแต่งนั้นไม่มีนัยยะสำคัญ และทำให้ตัวสถาปัตยกรรม โครงสร้าง การใช้สอยนั้นหลอมรวมกันตามหลักการของเหตุผล



ภาพที่ 9 ภาพประกอบจากหนังสือคู่มือประวัติศาสตร์ศิลปะของคูกเลอร์ ซึ่งนำเสนอการศึกษาสถาปัตยกรรมคลาสสิกผ่านเรขาคณิต
ที่มา: Locher, 1999

คาร์ล ชนาเซอ (Karl Schnaase) ลูกศิษย์อีกคนหนึ่งของบัวร์กฮาร์ดท์ ได้เขียนหนังสือชุดขึ้นจำนวน 7 เล่ม ชื่อ ประวัติศาสตร์วิจิตรศิลป์ (Geschichte der bildenden Künste) ในช่วงปี ค.ศ. 1843-1864 โดยในบทนำ เขากล่าวถึงความสำคัญของกฎทางคณิตศาสตร์ ว่าเป็นสาระสำคัญของสถาปัตยกรรม กฎธรรมชาติเหล่านี้ปรากฏอยู่ในทุกสรรพสิ่ง เขาเชื่อว่าความงามในสถาปัตยกรรมนั้นไม่ได้ผูกติดอยู่กับประโยชน์ใช้สอย แต่เป็นสภาวะของการกลืนประสานศิลปะเข้ากับทุกสิ่ง (ในที่นี้คืออยู่บนกฎทางคณิตศาสตร์ซึ่งเขาเห็นว่าเป็นหลักการสากลในธรรมชาติ)

ในช่วงปี ค.ศ.1840-1863 ฟรีดริช โอฟชตัดท์ (Friedrich Hoffstadt) ศิลปินชาวเมืองมันน์ไฮม์ (Mannheim) ได้เขียนหนังสือเรื่อง สถาปัตยกรรมโกธิค เอ-บี-ซี (Gothisches A-B-C Buch) วิเคราะห์งานสถาปัตยกรรมโกธิคจากอาคารเก่าหลายหลังทั่วภาคพื้นเยอรมนี ทั้งในแบบรูปสถาปัตยกรรม และระบบการก่อสร้าง จากหนังสือดังกล่าวนี้ เขาได้เสนอข้อค้นพบสำคัญว่าเรขาคณิต คือเครื่องมือสำคัญในการสร้างสรรค์งานสถาปัตยกรรม ซึ่งปรากฏทั้งในแปลน รูปด้าน และการก่อหิน และเขาได้เสนอแนวคิดเรื่องการยกให้รูปแบบสถาปัตยกรรมโกธิคคือรูปแบบสถาปัตยกรรมของเยอรมนี โดยเขาสรุปว่า เรขาคณิตคือธรรมชาติ คือชาวคริสเตียน คือโกธิค คือชาวเยอรมัน (Geometric = Natural = Christian = Gothic = German) (ibid.)



ภาพที่ 10 การวิเคราะห์สถาปัตยกรรมโกธิคของโฮฟตัดด์ ซึ่งแสดงให้เห็นการผสมผสานเรขาคณิตเข้ากับระบบโครงสร้างในงานสถาปัตยกรรม โดยเฉพาะสถาปัตยกรรมโกธิค

ที่มา: Hoffstadt, 1840

2.1.2 การผสมผสานเทคโนโลยีการก่อสร้างกับสถาปัตยกรรม

ในปี ค.ศ. 1851 เซมเปอร์ สถาปนิกและนักทฤษฎีสถาปัตยกรรมคนสำคัญได้เขียนบทความชื่อ วิทยาศาสตร์, อุตสาหกรรม และศิลปะ (Wissenschaft, Industrie und Kunst) ซึ่งเป็นการถ่ายทอดความคิดเมื่อกลับจากการไปศึกษาดูงานนิทรรศการที่ลอนดอน เซมเปอร์สนับสนุนแนวคิดเรื่องคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์ในงานสถาปัตยกรรม ผ่านกระแสของยุคอุตสาหกรรม และเชื่อว่าโลกของการออกแบบสถาปัตยกรรมได้เดินทางมาถึงจุดเปลี่ยนทางความคิดแล้ว นอกจากนี้ เซมเปอร์ยังเริ่มสร้างฐานความคิดเรื่องวัสดุและการก่อสร้างซึ่งจะถูกพัฒนาไปเป็นแนวคิดเรื่ององค์ประกอบพื้นฐานทางสถาปัตยกรรม 4 อย่างของเขาต่อไป โดยพื้นฐานนั้น เซมเปอร์เสนอว่า เราควรปล่อยให้วัสดุก่อสร้างเปิดเผยเนื้อแท้ของตัวเองออกมาแก่สาธารณชน ปล่อยให้อิฐ ไม้ เหล็ก แสดงตัวเองโดยไม่ปิดบัง ทั้งในเรื่องของตัววัสดุและกฎของแรงกระทำในโครงสร้าง (ibid., 313-317)

2.1.3 สมาพันธ์แรงงานเยอรมัน (Deutscher Werkbund)

ผลจากการปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 ทำให้ผู้คนเริ่มหลงใหลของใหม่เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ช่างฝีมือและความนิยมในงานศิลปหัตถกรรมลดน้อยถอยลงเรื่อยๆ วิลเลียม

มอร์ริส (William Morris) ศิลปินและนักออกแบบชาวอังกฤษซึ่งมีแนวคิดต่อต้านอุตสาหกรรมได้ร่วมกับกลุ่มนักออกแบบอีกจำนวนหนึ่งก่อตั้ง "กลุ่มช่างศิลป์และหัตถกรรมสมาคม" (Art Worker's Guild and Guild of Handicrafts) และ "สมาคมนิทรรศการศิลป์หัตถกรรม" (The Arts and Crafts Exhibition Society) ถือเป็นการเคลื่อนไหวทางศิลปหัตถกรรม (Arts and Crafts Movement) ที่สำคัญและแพร่หลายไปสู่ประเทศต่างๆ ในยุโรปในรูปแบบของศิลปะแนวใหม่ ผลงานของกลุ่มสามารถสร้างความนิยมศิลปและหัตถกรรมให้กลับมาได้อีกครั้งหนึ่ง และยังสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศเป็นจำนวนมาก



Wallpaper
by John Henry Dearle
1897.



The William Morris Chair
1886



Typical Metalworking of
the Art and Crafts
Movement

ภาพที่ 11 ผลงานการออกแบบในแนวทางของกลุ่มการเคลื่อนไหวศิลปะและหัตถกรรม (Art and crafts movement) ในประเทศอังกฤษ

ที่มา: <https://technologystudent.com/prddes1/artsandcrafts1.html>

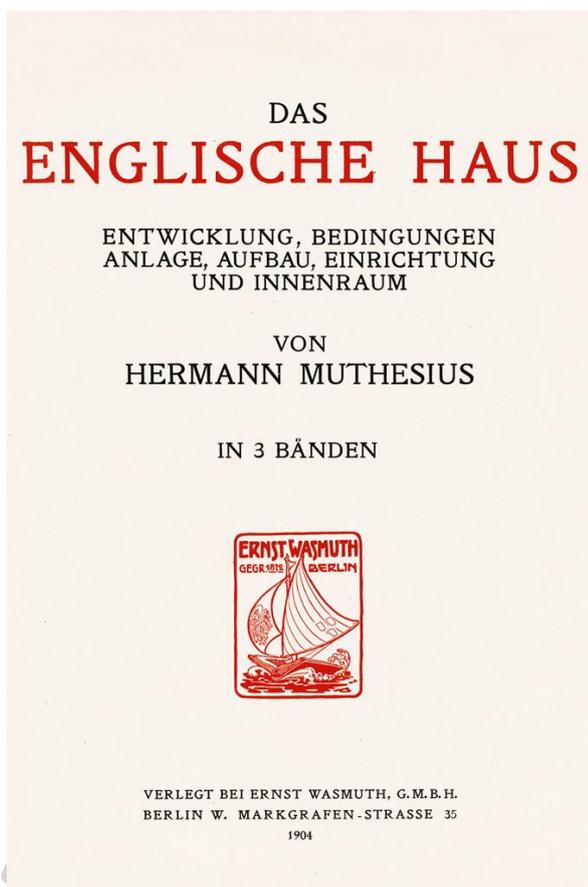
จากความนิยมความงามตามกลุ่มช่างศิลป์ดังกล่าว ได้ส่งผลกระทบต่อแนวทางการดำเนินนโยบายทางการผลิตสินค้าไปทั่วยุโรป เยอรมนีเองขณะนั้นก็ตกอยู่ในสภาวะที่ต้องการแข่งขันในเชิงเศรษฐกิจในกลุ่มประชาคมยุโรปด้วยเช่นกัน นักการเมือง และผู้นำรัฐในขณะนั้นจึงมีนโยบายที่จะต้องปฏิรูปการศึกษาการออกแบบและการผลิตสินค้าเพื่อเข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบการค้า

ในช่วงปี ค.ศ. 1896-1903 รัฐบาลได้สนับสนุนเงินทุนให้แก่ เฮอร์มันน์ มุทเธเซอุส (Hermann Muthesius) ในการเดินทางไปศึกษาดูงานที่กรุงลอนดอน เมื่อกลับมาเยอรมนีจึงมีแนวคิดที่จะปฏิวัติการเรียนการสอนออกแบบและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับการพัฒนาของอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งแนวคิดนี้สอดคล้องกับการคำนึงถึงวัสดุก่อสร้าง เทคนิคการก่อสร้าง และประโยชน์ใช้สอย แนวคิดเชิงวิศวกรรมจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญสำหรับการสร้างสรรค์งานออกแบบ มุทเธเซอุสได้พยายามนำเอาหลักการเหตุผลแบบวิศวกรรมเข้ามาผสานกับงานออกแบบ

สถาปัตยกรรม ในฐานะเป็นหลักการพื้นฐาน ดังนั้น สถาปัตยกรรมจึงกลายเป็นสิ่งที่หลอมรวมเอา ความรู้เชิงเทคนิคและศิลปะเข้าด้วยกัน

ในปี ค.ศ. 1906 มุทเธเซอูสได้ร่วมกับ ฟรีดริช นาวมันน์ (Friedrich Naumann) และ คาร์ล ชมิดท์ (Karl Schmidt) แสดงออกถึงการต่อต้านแนวทางการออกแบบอนุรักษนิยมผ่านงาน นิทรรศการ คณะผู้ใช้แรงงาน(Arbeitskommissar) และเสนอการผสมผสานระบบการผลิตแบบ อุตสาหกรรมเข้ากับงานออกแบบ และในปีถัดมา ทั้งสามได้ร่วมกันก่อตั้งสมาพันธ์แรงงานเยอรมัน หรือ Deutscher Werkbund ซึ่งประกอบด้วยนักออกแบบ 12 คน และบริษัทผู้ผลิตอีก 12 แห่ง เพื่อ ร่วมกันสนับสนุนการออกแบบและการศึกษาด้านศิลปะและการออกแบบที่ให้ความสำคัญกับระบบ การผลิตแบบอุตสาหกรรม (Kenneth Frampton, 1992: 109-115) (Xiaonan Zhang, 2020: 111-114)





ภาพที่ 12 หนังสือ บ้านอังกฤษ (Das Englische Haus) ซึ่งเขียนขึ้นโดยมูเทเซอุส ตีพิมพ์ในเบอร์ลิน เมื่อปี ค.ศ.1904 เป็นการนำเสนอแนวทางการออกแบบที่อยู่อาศัยในประเทศอังกฤษ ซึ่งรวบรวมจาก ประสบการณ์ระหว่างที่มูเทเซอุสได้ไปศึกษาดูงาน ณ กรุงลอนดอน ในช่วงระหว่างปี ค.ศ.1896-1903 อันเป็นช่วงเวลาก่อนที่จะมีการก่อตั้งสมาพันธ์แรงงานเยอรมันไม่นาน

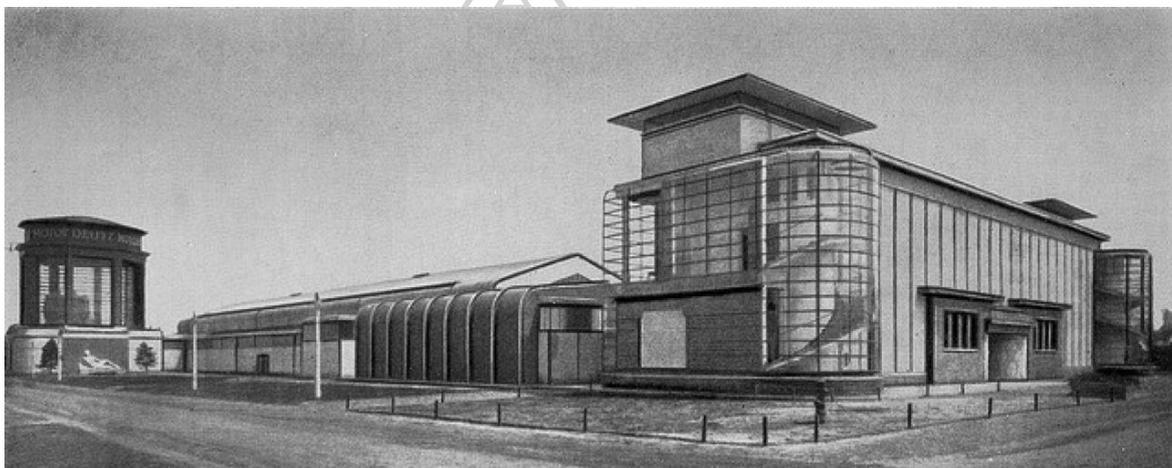
ที่มา:

https://de.wikipedia.org/wiki/Hermann_Muthesius#/media/Datei:Muthesius_Das_englische_Haus.jpg

ดังนั้น สมาพันธ์แรงงานเยอรมัน จึงเป็นกลุ่มของนักออกแบบและนักอุตสาหกรรมที่มีแนวคิดในการปฏิบัติการทำงานออกแบบ โดยได้รับอิทธิพลจากกลุ่ม art and crafts movement และแนวคิดนี้เองต่อมาพัฒนาเป็นการวางรากฐานการศึกษาของสถาบันบาวเฮาส์ ซึ่งเป็นโรงเรียนสอนศิลปะและการออกแบบในแนวทางของการผสมผสานเทคโนโลยีกับศิลปะเข้าด้วยกันในปี ค.ศ. 1919 ที่เมืองไวมาร์ ซึ่งมีสถาปนิกวอลเธอร์ โกรปิอุส สมาชิกคนสำคัญของกลุ่มสหพันธ์แรงงานเยอรมันเป็นผู้อำนวยการ

2.1.4 บาวเฮาส์

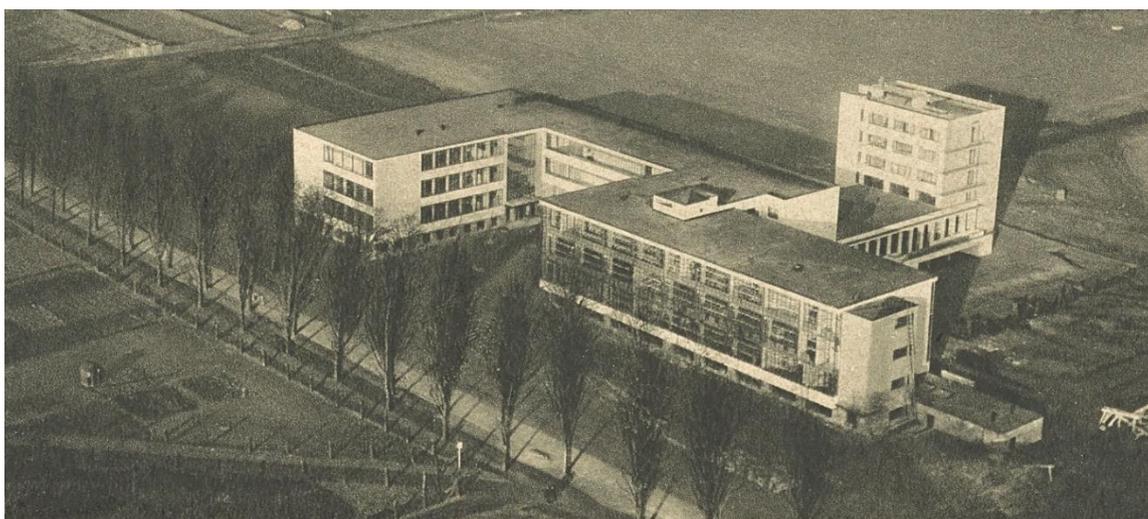
วาลเธอร์ โกรปิอุส (Walter Gropius) เป็นหนึ่งในบุคคลสำคัญของกลุ่มสหพันธ์แรงงานเยอรมัน เขาเริ่มต้นจากการทำงานในสำนักงานของ เพเธอร์ เบห์เรนส์ (Peter Behrens) และได้ร่วมออกแบบโครงการสำคัญหลายโครงการ เช่น โรงไฟฟ้าของบริษัท AEG โรงงานรอกเท้าฟากัส (Fagus) ต่อมาได้รับหน้าที่เป็นผู้อำนวยการโรงเรียนออกแบบและศิลปะที่เมืองไวมาร์ต่อจากเฮนรี ฟาน เดอเวลล์ ในปี ค.ศ. 1919 ซึ่งโกรปิอุสได้เปลี่ยนชื่อโรงเรียนเป็น บาวเฮาส์ ซึ่งมีปรัชญาการศึกษาที่ตอบสนองต่อแนวคิดของกลุ่มสหพันธ์แรงงานเยอรมัน โดยโกรปิอุสเสนอให้ทำการศึกษาแบบ workshop-based เพื่อให้นักเรียนได้มีทักษะในการปฏิบัติและเข้าใจกระบวนการผลิต



ภาพที่ 13 Deutscher Werkbund Pavilion 1914 เมืองโคตลยุงน์ ออกแบบโดยวาลเธอร์ โกรปิอุส และ ออตอล์ฟ เมเยอร์

ที่มา: [https://alchetron.com/Werkbund-Exhibition-\(1914\)](https://alchetron.com/Werkbund-Exhibition-(1914))

บาวเฮาส์ จึงกลายเป็นโรงเรียนสอนการออกแบบและการก่อสร้างในแนวคิดใหม่นี้ อย่างไรก็ตาม การก่อตั้งภาควิชาสถาปัตยกรรมนั้น เกิดขึ้นในช่วงหลัง (ค.ศ. 1927 โดย ฮานเนส เมเยอร์ Hannes Mayer) โดยในการดำเนินการของสถาบันนั้น เริ่มจากการผสมผสานศาสตร์การออกแบบทุกอย่างอย่างรวมกัน (Einheitkunstwerk) เรียนโดยเน้นการฝึกปฏิบัติในโรงฝึกงานร่วมกับอาจารย์ผู้เชี่ยวชาญ (Hanno-Walter Krufft, 1994: 381-392)



ภาพที่ 14 อาคารเรียนบาวเฮาส์ ที่เมืองเดสซา ออกแบบโดยวอลเธอร์ โกรปิอุส

ที่มา: <https://www.bauhaus-dessau.de/en/architecture/bauhaus-building.html>

นอกจากนั้นแล้วยังมีกลุ่มความคิดที่ช่วยส่งเสริมแนวคิดใหม่ที่เรียกว่า กลุ่มภววิสัยใหม่ (Die neue Sachlichkeit) ซึ่งเป็นแนวคิดในการออกแบบที่เกิดขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 1924-1930 ซึ่งเกิดจากการรวมกลุ่มกันของนักออกแบบเยอรมันและรัสเซีย เป็นแนวทางการออกแบบเพื่อสังคม ให้ความสำคัญกับคนส่วนใหญ่ของสังคมมากกว่าชนชั้นสูง ผลส่วนหนึ่งมาจากสภาวะเศรษฐกิจที่ย่ำแย่หลังสงครามของทั้งสองประเทศ ทำให้สองประเทศหันมาแสวงความร่วมมือกัน นักออกแบบคนสำคัญที่มีอิทธิพลในช่วงนี้เช่น เอล ลิสซิทสกี (El Lissitzky) มาร์ท ชตัม (Mart Stam) ฮานเนส เมเยอร์ (Hannes Mayer) และ แอรนสท์ เมย์ (Ernst May) ผลงานการออกแบบมักนิยมใช้วัสดุก่อสร้างสมัยใหม่เช่น เหล็ก กระจก และใช้ระบบการก่อสร้างแบบประสานทางพิกัด โกรปิอุสเองก็มีส่วนในการผลักดันแนวคิดนี้ด้วย เช่น มีการนำเสนอแนวคิดสำหรับการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยเพื่อชุมชนในที่ประชุม CIAM 1930 frampton ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า แนวคิดของสถาบันสถาปัตยกรรมที่เบอร์ลินแต่เดิมนั้นคือ ภววิสัยแบบเก่า (Alte Sachlichkeit) ส่วนบาวเฮาส์นั้นได้นำเสนอภววิสัยแบบใหม่ (Neue Sachlichkeit) (Marcus Hackel, 2007: 1-22)



ภาพที่ 15 ภาพเหมือนตนเอง เอล ลีลิสซิทสกี

ที่มา: <https://www.moma.org/collection/works/83836>

2.1.5 การทวนกลับสู่สถาปัตยกรรมคลาสสิก

เมื่อถึงยุคสมัยนาซีเรื่องอำนาจ แนวคิดและรูปแบบงานสถาปัตยกรรมตามวิธีของชาวเฮาส์ก็กลายเป็นความนิยมในเยอรมนี ด้วยความต้องการสร้างอัตลักษณ์ของชาติแบบฮิตเลอร์ ที่หันไปสนับสนุนรูปแบบสถาปัตยกรรมนีโอคลาสสิกแทน ประกอบกับการย้ายถิ่นฐานของคณาจารย์ชาวเฮาส์ไปยังสหรัฐอเมริกา ทำให้การออกแบบสถาปัตยกรรมและผลิตภัณฑ์ของเยอรมนีหยุดชะงักลงหันกลับไปฝึกฝนงานแนวนีโอคลาสสิก ตามแนวทางปรัชญาของเฮเกล และรูปแบบสถาปัตยกรรมแบบซิงเคิล เพื่อทวนคืนสู่ความเป็นอนารยะชนที่ยิ่งใหญ่ โดยสถาปนิกครสำคัญในยุคนาซีเรื่องอำนาจเช่น ไฮน์ริช เทสเซนโนว (Heinrich Tessenow) และ เพาว์ล ชุลทเซ-นวมบูร์ก (Paul Schultze-Naumburg) นำเสนอการออกแบบตามแนวคิดรูปแบบมาตุภูมิ (Heimatstil) ได้นำเอาหลังคาทรงปั้นหยาแบบโบราณกลับมาแทนที่หลังคาแบน ซึ่งเคยเป็นที่นิยมในแนวทางของกลุ่มภววิสัยใหม่ และต่อมาฮิตเลอร์ ผู้นำรัฐบาลในยุคนั้นได้รับการสนับสนุนจากสถาปนิก เพาว์ ลุดวิก ทรูสต์ (Paul Ludwig Troost) และ อัลแบร์ต สเปร์ (Albert Speer) เสนอผลงานการออกแบบเมืองหลวงของโลก (Germania) และอาณาจักรไรช์ที่สามตามแนวคิดนีโอคลาสสิกของเขา รวมทั้งผลงานการออกแบบ

อาคารสาธารณะอีกเป็นจำนวนมากทั่วเยอรมนี (Frampton, 1992) (Heiko Burdkardt, 2012: 1-18)



ภาพที่ 16 ฮิตเลอร์ขณะวิจารณ์งานออกแบบสถาปัตยกรรม อัลแบร์ต ชแปร์ (คนที่ 2 จากซ้าย)

ที่มา: www.youtube.com





ภาพที่ 17 ทุนจำลองเมืองแกร์มาเนีย (Germania)

ที่มา: <https://en.wikipedia.org/>

2.1.6 ประสบการณ์ในสหรัฐอเมริกาของไฟร โอทโท

ไฟร โอทโท ถือได้ว่าเป็นนักออกแบบผู้ยิ่งใหญ่ของเยอรมันในยุคหลังสงครามโลกครั้งที่สอง เป็นสถาปนิกที่พลิกโฉมหน้างานออกแบบเยอรมันให้ขึ้นสู่ระดับนานาชาติได้อย่างภาคภูมิใจ (Harry Francis Mallgrave and David Goodman, 2011: 70-74)

หลังจากกลับเข้าศึกษาสถาปัตยกรรมอีกครั้งภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 สงบลง ไฟร โอทโท มีโอกาสได้รับทุนการศึกษาจากรัฐบาลเพื่อเดินทางไปศึกษาและดูงานในสหรัฐอเมริกา ระหว่างปี ค.ศ. 1951-1952 ซึ่งเป็นประสบการณ์ชีวิตที่สำคัญอันส่งผลต่อการก่อรูปแนวความคิดและปรัชญาการออกแบบของโอทโทเอง โดยเฉพาะการได้เข้าเยี่ยมชมปะกับเฟรด เซเวอร์ด (Fred Severud) และแมทธิว โนวิคคิ (Matthew Nowicki) ที่สำนักงานออกแบบของเขา ที่ซึ่งโอทโทได้เห็นแบบของอาคารสนามกีฬา ราเลย์ อาร์น่า (Raleigh Arena) อันกลายเป็นผลงานที่สร้างแรงบันดาลใจให้โอทโทเขียนคู่มือพิมพ์เรื่องโครงสร้างหลังคารับแรงดึงของเขา (Frei Otto, 1954: 13)



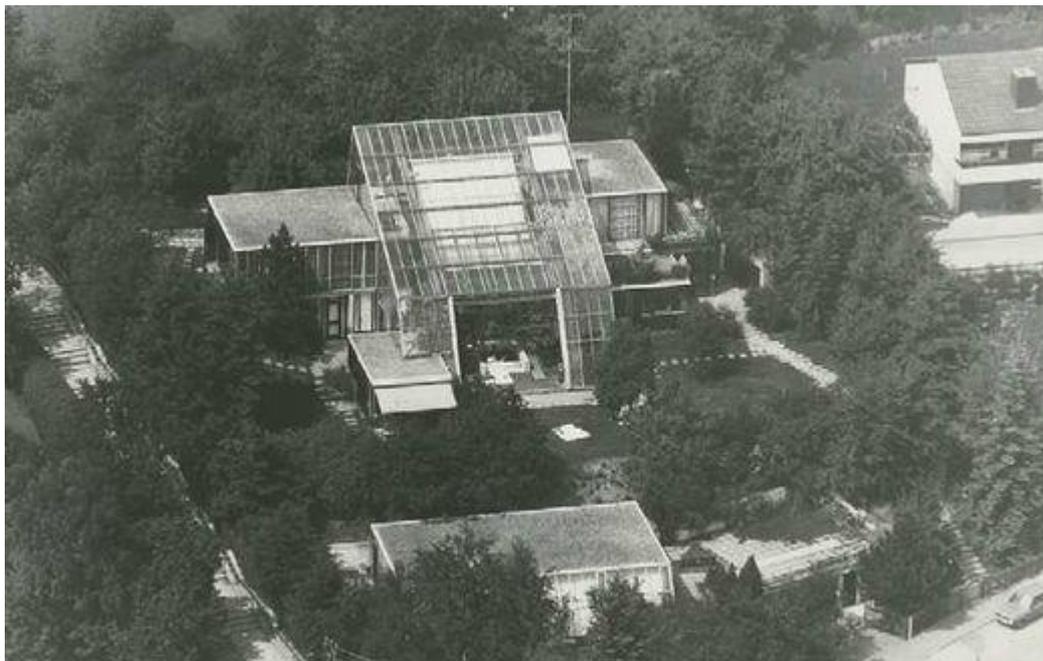
ภาพที่ 18 การใช้โครงสร้างรับแรงดึงส่วนหลังคาของสนามราเล้ก อารีนา

ที่มา: <http://www.arcaro.org/>

นอกจากการได้พบกับเซเวอรูดและโนวิกคิแล้ว โอทโทยังได้เข้าเยี่ยม พบปะ กับสถาปนิกหัวก้าวหน้าในยุคนั้นอีกมากมาย เช่น เอริค เมนเดลโซฮัน (Erich Mendelsohn) แฟรงก์ ลอยด์ ไรท์ (Frank Lloyd Wright) มีส ฟาน แดร์ โรฮ์ (Mies van der Rohe) เป็นต้น ซึ่งโอทโทได้บันทึกประสบการณ์และความคิด ความรู้สึกที่เขามีในช่วงนั้นไว้ สะท้อนให้เห็นการพัฒนาปรัชญาของตนเองได้อย่างชัดเจน (Frei Otto, Berthold Burkhardt ed., 1984: 4-11)

ในบทความชื่อ พบ แฟรงก์ ลอยด์ ไรท์ (Ein Besuch bei Frank Lloyd Wright) ตีพิมพ์ในปี ค.ศ.1952 หลังจากเดินทางกลับมาเยอรมนีแล้ว แสดงให้เห็นความนิยมแนวคิดใหม่ในการออกแบบที่เปิดกว้าง และยังแสดงให้เห็นเค้าโครงความคิดเรื่องความสนใจโครงสร้างเบาชั่วคราวของเขาด้วย ดังปรากฏในส่วนหนึ่งของบทความว่า

“.....เมื่อฤดูร้อนมาถึง ที่นี่ (ทาลีซินตะวันตก) จะถูกปล่อยทิ้งไว้ เพราะอากาศที่ร้อนจัดเกินไป ในช่วงต้นปี เมื่อทะเลทรายพรางร่างตนเองด้วยดอกไม้ต้นไม้ที่เริ่มเบ่งบาน สมาชิกทุกคนจะเก็บข้าวของขึ้นรถและป้ายหน้าขึ้นเหนืออีกครั้งหนึ่ง การเดินทางโยกย้ายสถานที่เช่นนี้อาจถูกมองว่าเป็นการกระทำของกลุ่มคนที่หยิ่งทรนงและแปลกประหลาด โดยเฉพาะกับนักผังเมืองชาวฟิสิกส์ แต่ข้าพเจ้ามองว่ามันเป็นธรรมชาติมาก” (Frei Otto, Berthold Burkhardt ed., 1984: 5)



ภาพที่ 19 บ้านพักอาศัยและสตูดิโอทำงานของไฟร โอทโท ที่วาร์มบรอนน์
ที่มา: <https://www.lemoniteur.fr/>

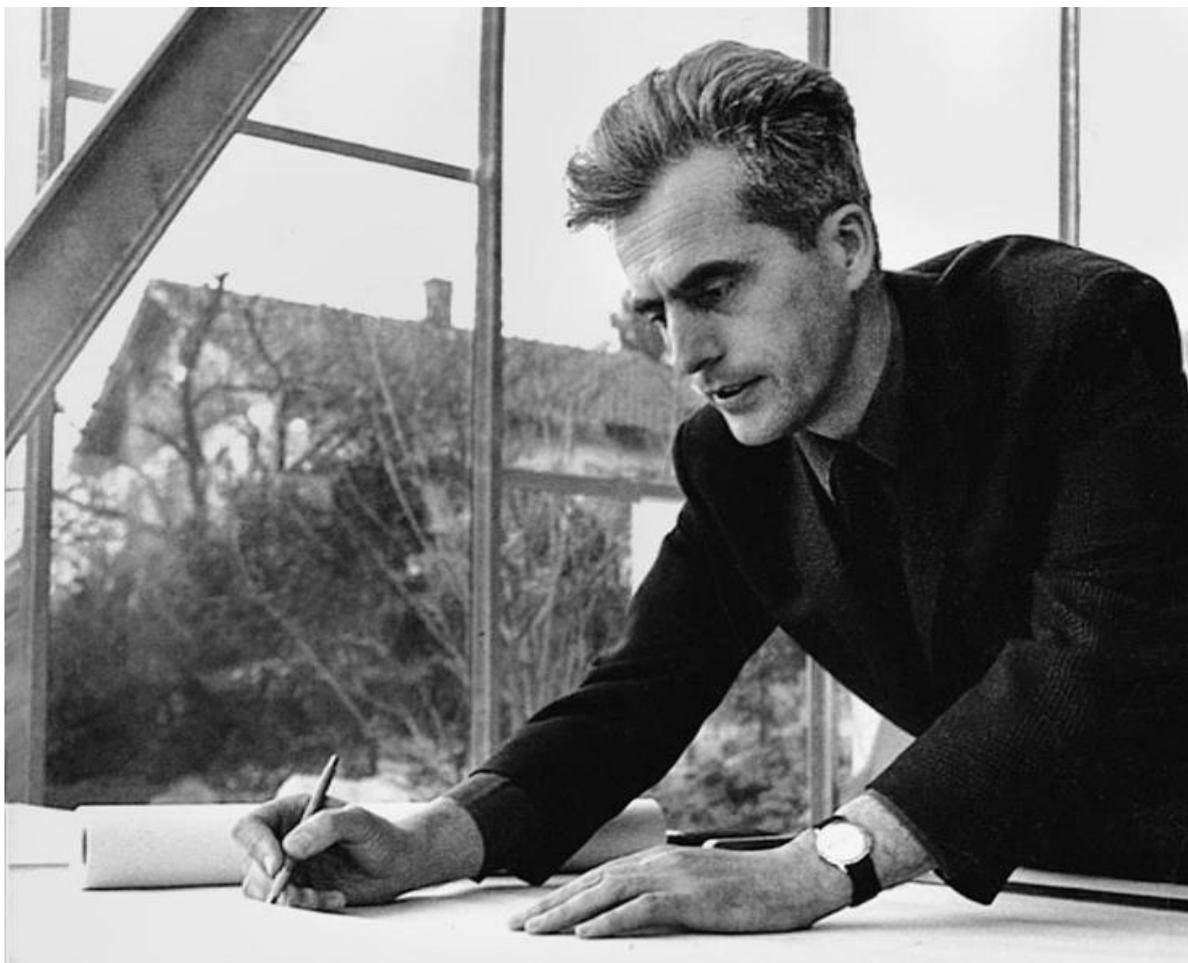
ในปี ค.ศ. 1955 ซึ่งเป็นระยะเวลาหนึ่งปีหลังจากโอทโทจบการศึกษาระดับปริญญาเอก และได้เริ่มก่อตั้งสำนักงานของตนเองขึ้นที่เบอร์ลิน โอทโท ได้ตีพิมพ์บทความวิพากษ์แนวทางการออกแบบสถาปัตยกรรมในเยอรมนี ในบทความชื่อ การสร้างสำหรับอนาคต? เป็นบทวิพากษ์การออกแบบอาคารพักอาศัยในเยอรมนี (Bauten für morgen?) (Frei Otto, Berthold Burkhardt ed., 1955: 1-3) โดยมีเนื้อหาในเชิงปฏิเสธแนวคิดและวิธีการออกแบบตามขนบเดิมที่เคยปฏิบัติกันมา และได้เสนอทัศนะที่เรียกร้องให้มีการเปิดกว้างยอมรับความคิดของคนรุ่นใหม่ที่มองปัญหาเรื่องสภาพแวดล้อมและการอยู่ร่วมกันกับโลกธรรมชาติในอนาคต ซึ่งแนวคิดนี้เองที่ถูกกล่าวถึงซ้ำ ๆ และมีการขยายความในอีกหลาย ๆ บทความหรือการบรรยายของเขา และนับจากทศวรรษที่ 1960 เป็นต้นมา แนวคิดและวิธีการของไฟร โอทโท ได้เข้ามามีบทบาทในการขับเคลื่อนแนวคิดในการออกแบบสถาปัตยกรรมและโครงสร้างในระดับนานาชาติ



ภาพที่ 20 ภาพร่างโครงการอพาร์ทเมนต์ที่นิวยอร์ก โดยเฟร โอทโท ค.ศ. 1959

ที่มา: <https://www.e-flux.com/>

2.2 ชีวิตประวัติโดยสังเขป



ภาพที่ 21 ไพร โอทโท (Frei Otto)

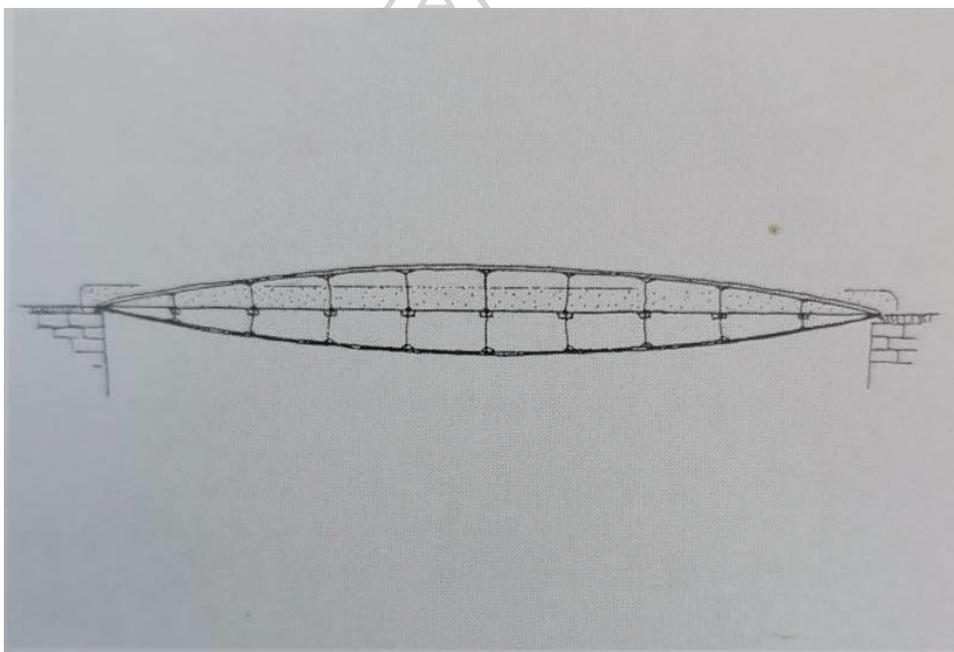
ที่มา: <https://www.detail-online.com/>

ไพร เพาวล์ โอทโท (Frei Paul Otto, 31 May 1925 - 9 March 2015) หรือ ไพร โอทโท เป็นสถาปนิกชาวเยอรมัน เกิดที่เมืองซิกมาร์ (Siegmars) ปัจจุบันเป็นส่วนหนึ่งของเมืองเชมนิทซ์ (Chemnitz) ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ปู่ของเขาเป็นช่างหิน และบิดาเป็นประติมากร ซึ่งทั้งคู่เป็นสมาชิกของสมาพันธ์แรงงานเยอรมัน (Deutscher Werkbund) หลังจากจบมัธยมศึกษาแล้ว โอทโทเข้าศึกษาสถาปัตยกรรมที่มหาวิทยาลัยเทคนิคเบอร์ลิน (Technische Universität Berlin) (Reinhard Erfurth and Christine Otto-Kanstinger, 2017: 9)

ช่วงปี ค.ศ. 1943 ระหว่างกำลังศึกษาสถาปัตยกรรมอยู่ รัฐบาลนาซีซึ่งปกครองสาธารณรัฐไวมาร์ (เยอรมนีและบางส่วนของออสเตรีย) ในขณะนั้น ได้เปิดสงครามรุกรานประเทศเพื่อนบ้านในยุโรปและได้นำพาประเทศเข้าสู่สงคราม โอทโท ในฐานะพลเมืองเยอรมันได้ถูกเกณฑ์ไปเป็นทหารในสงครามนี้ด้วยเช่นกัน โดยได้เข้าสังกัดกองทัพอากาศ ซึ่งทำให้เขาได้รับประสบการณ์เกี่ยวกับการบิน

ได้สังเกตเครื่องบินซึ่งมีโครงสร้างที่เบาและสามารถลอยขึ้นในอากาศได้ และในขณะเดียวกันก็ได้มองเห็นภาพเมืองจากมุมสูงซึ่งถูกทำลายด้วยสงคราม

ในปี ค.ศ. 1945 สัมพันธมิตรมีชัยเหนือนาซีเยอรมัน ไพร่ โอทโท ถูกจับเป็นเชลยสงคราม และถูกส่งตัวไปยังค่ายกักกันใกล้เมืองชาร์ต (Chartres) ทางตอนใต้ของประเทศฝรั่งเศส ที่นั่นเองเขาได้มีโอกาสรู้จักกับวิศวกรชาวเยอรมันซึ่งถูกจับเป็นเชลยด้วยกัน และในฐานะที่เป็นนักเรียนสถาปัตยกรรม โอทโทจึงได้รับหน้าที่เป็นสถาปนิกและวิศวกรประจำค่าย ซึ่งทำให้เขาได้เรียนรู้เรื่องพื้นฐานทางวิศวกรรมและการออกแบบซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องวัสดุและแรงงาน (Frei Otto, Juan Maria Songel, 2010: 36-37)



ภาพที่ 22 สะพานข้ามแม่น้ำออยเรอ (Eure) ใกล้เมืองชาร์ต (Chartres) ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งไฟรี โอทโทออกแบบในช่วงเป็นเชลยสงคราม ค.ศ. 1946 แสดงให้เห็นถึงความสนใจเรื่องการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงของเขา

ที่มา: Winfried Nerdinger, 2019: 172

เมื่อได้รับการปล่อยตัวในปี ค.ศ. 1947 โอทโท ได้กลับเข้าศึกษาสถาปัตยกรรมอีกครั้งยังมหาวิทยาลัยเดิม ต่อมาในปี ค.ศ. 1951 เขาเป็นนักเรียนสถาปัตยกรรมชาวเยอรมันคนแรกที่ได้รับทุนการศึกษาในโครงการแลกเปลี่ยนสำหรับนักศึกษาเยอรมันให้เดินทางไปสหรัฐอเมริกาเป็นระยะเวลา 6 เดือน นอกจากเขาจะได้ลงทะเบียนเรียนวิชาทางด้านสังคมศาสตร์ที่มหาวิทยาลัยเวอร์จิเนีย (University of Virginia) แล้ว เขายังได้ใช้โอกาสนี้เดินทางไปพบปะพูดคุยกับสถาปนิกคน

สำคัญหลายคนที่อพยพหนีภัยสงครามมายังสหรัฐอเมริกา เช่น เอริค เมนเดลโซฮ์น (Erich Mendelsohn) มีส ฟาน แดร์ โรฮ์ (Mies van der Rohe) รวมถึงสถาปนิกอเมริกัน แฟรงค์ ลอยด์ ไรท์ (Frank Lloyd Wright) ซึ่งโอทโทได้บันทึกเรื่องราวประสบการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ไว้อย่างละเอียด ในหนังสือรวมบทความของเขา ชื่อ Frei Otto: Schriften und Reden 1951-1983 ซึ่งบทความเหล่านี้ได้สะท้อนให้เห็นแรงบันดาลใจที่ยิ่งใหญ่ในการศึกษาและค้นคว้าเรื่องการออกแบบสถาปัตยกรรมของเขา แต่ก็สะท้อนความเป็นตัวเองของเขาอย่างเด่นชัด แม้หลายบทความของโอทโทจะกล่าวชื่นชมแนวคิดและผลงานของสถาปนิกเอกของยุค แต่ก็มักแสดงความคิดเห็นส่วนตัวในเชิงวิพากษ์ไว้ด้วยเสมอ

ในปี ค.ศ. 1954 ไพร โอทโท เขียนคู่มือสั้นเรื่อง Das hängende Dach หรือ โครงหลังคารับแรงดึง โดยศึกษาเรื่องการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงที่สามารถคลุมพื้นที่ช่วงพาดกว้างได้ เขาได้รับความร่วมมือจากบริษัทผู้ผลิตและก่อสร้างเต็นท์ เพเทอร์ ชโตร์เมเยอร์ (Peter Stromeyer) ซึ่งต่อมาหลังจากจบการศึกษาแล้วได้ร่วมกันออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างเต็นท์ในรูปแบบใหม่หลายแห่ง เช่น โครงหลังคาเต็นท์ในงานสวนแห่งชาติ (Bundesgartenschau) ที่เมืองคาสเซล (Kassel) เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1964 โอทโท ได้ก่อตั้งสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา (Institut für Leichte Flächentragwerke, IL) ขึ้น ที่มหาวิทยาลัยชตุทท์การ์ท (Universität Stuttgart) โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาวิธีการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างเบาขนาดมหึมาชนิด ตลอดระยะเวลากว่า 33 ปีในฐานะผู้อำนวยการสถาบัน โอทโทได้ศึกษา ทดลอง และผลิตงานวิจัยเพื่อสร้างองค์ความรู้ในเรื่องเหล่านี้ไว้มากมาย โดยเฉพาะการนำเสนอรายงานวิจัยที่มีต่อเนื่องตลอดระยะเวลากว่า 40 เล่ม (IL research) จนเป็นที่รู้จักกันในหมู่นักออกแบบและนักวิชาการที่มีความสนใจเรื่องการออกแบบสถาปัตยกรรมหรือวิศวกรรมโครงสร้างเบาทั่วโลก

ผลงานจากการศึกษาและทดลองของไพร โอทโท นอกจากจะเป็นงานด้านวิชาการแล้ว โอทโทเองได้ประยุกต์ใช้ความรู้จากการศึกษาเหล่านั้นมาสู่งานออกแบบและก่อสร้างจริงอีกจำนวนมาก ทั้งที่ทำด้วยตนเองที่สตูดิโอส่วนตัวของเขา หรือจะเป็นการทำงานร่วมกับสถาปนิก วิศวกร หรือนักออกแบบคนอื่น ๆ ก็ตาม โดยเขาได้เปิดสำนักงานออกแบบส่วนตัวของเขาที่เบอร์ลินตั้งแต่ปี ค.ศ. 1952 ก่อนที่จะก่อตั้งสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา โครงการต่าง ๆ ที่โอทโทได้ออกแบบหรือมีส่วนร่วม เช่น ศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีออล (Montreal) ในปี ค.ศ. 1967 หลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิก ที่เมืองมิวนิก (Munich) ปี ค.ศ. 1972 โครงสร้างโถงคลุมพื้นที่ในงานจัดแสดงสวน ที่เมืองมันน์ไฮม์ (Mannheim) ปี ค.ศ. 1974 งานออกแบบอาคารผู้โดยสารที่สนามบินเจดดาห์ (Jeddah) ประเทศซาอุดีอาระเบีย ในปี ค.ศ. 1981 หรืองานออกแบบโครงสร้างเบาคล้ายร่มขนาดใหญ่ที่มีสัณนิบาตินาห์ (Madinah) ร่วมกับ โบโด ราช (Bodo Rasch) ในปี ค.ศ. 1988 เป็นต้น



ภาพที่ 23 ไฟร โอทโท และ โบโด ราซ ภาพปิดสำหรับการแสดงผลงานการออกแบบในโอกาสรับ
รางวัล Deutscher Werkbund winning prize 1992
ที่มา: <https://www.sl-rasch.com/en/history>

นอกจากนั้น โอทโทยังได้ร่วมงานออกแบบกับสถาปนิกร่วมสมัยอีกหลายโครงการ เช่น ร่วมกันออกแบบศาลาในงานแสดงสินค้านานาชาติร่วมกับ ชิเงรุ บัน (Shigeru Ban) สถาปนิกชาวญี่ปุ่น ในปี ค.ศ. 2000 หรือร่วมกับสถาปนิกชาวเยอรมัน คริสทอฟ อิงเจนโฮเฟิน (Christoph Ingenhoven) ในโครงการออกแบบปรับปรุงสถานีรถไฟชตุทการ์ท ในปี ค.ศ. 2000 ซึ่งเป็นโครงการสุดท้ายที่โอทโททำก่อนจะเสียชีวิตในปี ค.ศ. 2015 ระหว่างที่โครงการดังกล่าวยังอยู่ในระหว่างดำเนินการก่อสร้าง

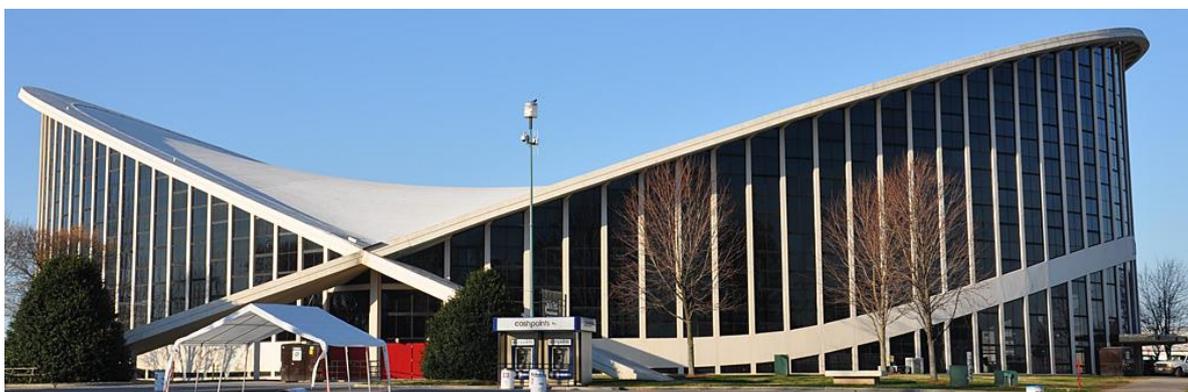
2.3 โครงสร้างหลังคารับแรงดึง: ปฐมบทของแนวคิดในการออกแบบของ ไฟร โอทโท

‘Das hängende Dach als Schlungskonstruktion für druckbeanspruchte Schalentragwerke’

Frei Otto, 1954: 158

ในปี ค.ศ. 1954 ไฟร โอทโท ได้นำเสนอการศึกษาระดับปริญญาเอกของเขาในหัวข้อเรื่อง โครงสร้างหลังคารับแรงดึง (Das hängende Dach) โดยส่วนแรกของการศึกษา โอทโท ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญและแรงจูงใจในการศึกษาของเขาที่กล่าวถึงโครงสร้างพาดช่วงกว้าง (wide-span structure) เช่น สะพาน ซึ่งสามารถพาดข้ามแม่น้ำ และนำพามนุษย์ให้สามารถสัญจรข้ามไปได้ ประกอบกับแรงบันดาลใจจากการพบเห็นหุ่นจำลองของอาคาร Raleigh arena ซึ่งออกแบบโดย แมทธิว โนวิคคิ (Matthew Nowicki) และเฟรด เซเวอร์ด (Fred Severud) ในระหว่างเดินทางไป

ศึกษาในสหรัฐอเมริกา (Heinrich Klotz, 1987: 36-40) ซึ่งเป็นอาคารที่แสดงออกถึงการออกแบบ
โครงสร้างรับแรงดึงที่เป็นอาคารครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่



ภาพที่ 24 Raleigh arena

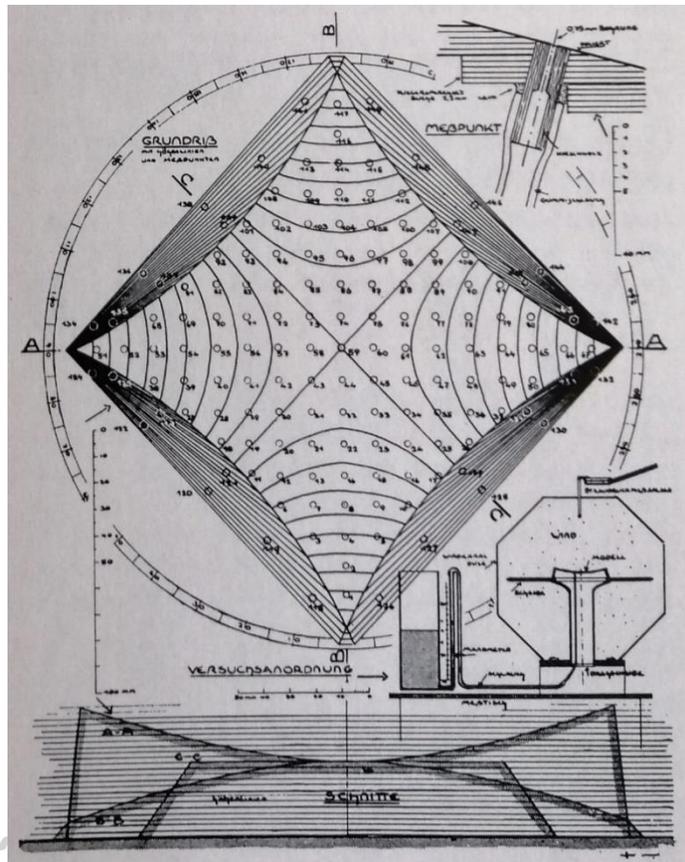
ที่มา: - <https://www.severud.com>

เนื้อหาในงานคณาภิพนธ์ของโอทโท ได้ศึกษาพฤติกรรมของแรงกระทำภายในโครงสร้าง
ของโครงสร้างพาดช่วงกว้างทั่วไปอีกจำนวนหนึ่ง แล้วทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแรงกระทำและ
ลักษณะของโครงสร้างที่มีพัฒนาการตามประวัติศาสตร์ ในอดีตนั้นมนุษย์สร้างสะพานด้วยการอาศัย
คุณสมบัติการรับแรงและการพาดช่วงโดยใช้โครงสร้างโค้ง (arch) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีในการรับแรงอัด
ในขณะที่มีโครงสร้างพาดช่วงอีกลักษณะหนึ่งที่ใช้เชือกในการพาดช่วงซึ่งอาศัยคุณสมบัติของวัสดุใน
การรับแรงดึง ด้วยลักษณะของชิ้นส่วนรับแรงดึงที่มีความเบา กลายเป็นสิ่งที่โอทโทให้ความสนใจ
โครงสร้างรับแรงดึงมากกว่าโครงสร้างรับแรงอัด ประกอบกับการได้เห็นโครงสร้างหลังคาที่อาคาร ดัง
ได้กล่าวแล้ว จึงเป็นแรงบันดาลใจให้โอทโทสนใจที่จะพัฒนาโครงสร้างรับแรงดึงที่สามารถครอบคลุม
พื้นที่ใช้งานภายในได้ อันเป็นการพัฒนาประยุกต์ความเข้าใจเรื่องโครงสร้างสะพานเข้ากับโครงสร้าง
หลังคา

เมื่อได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการออกแบบโครงหลังคาหลังรับแรงดึงเพื่อคลุมพื้นที่ใช้งาน
ภายในแล้ว โอทโทได้นำเสนอการวัสดุผ้าใบ (Zelt) หรือเต็นท์ เพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับการศึกษา
เนื่องจากคุณสมบัติของการเป็นเส้นใยคล้ายกับเชือกจำนวนมากมาสานเข้าด้วยกันเป็นผืนระนาบ หรือ
โอทโทเรียกว่า Zeltnetz วัสดุผ้าใบนี้จึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้เป็นโครงสร้างรับ
แรงดึงในลักษณะของการรับแรงดึงที่ผิว

หลังจากได้โจทย์หลักและวัสดุที่จะใช้ศึกษาแล้ว โอทโทได้ทดลองออกแบบโครงสร้าง
หลังคาผ้าใบเพื่อหาความเป็นไปได้ของรูปทรงต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น ซึ่งความสามารถของการเป็นรูปทรง
ของโครงหลังคาผ้าใบนั้น จำเป็นต้องมีการใส่แรงกระทำ (Vorgespannte) ที่เป็นแรงดึงเข้าไปใน

ทิศทางตรงกันข้ามกันเพื่อให้ผ้าใบคงรูปอยู่ เพราะฉะนั้นแล้ว ในกรณีนี้ แรงดึงนั้นไม่เป็นอุปสรรคของโครงสร้าง แต่เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมี เพื่อให้รูปทรงของหลังคานั้นเกิดขึ้นได้



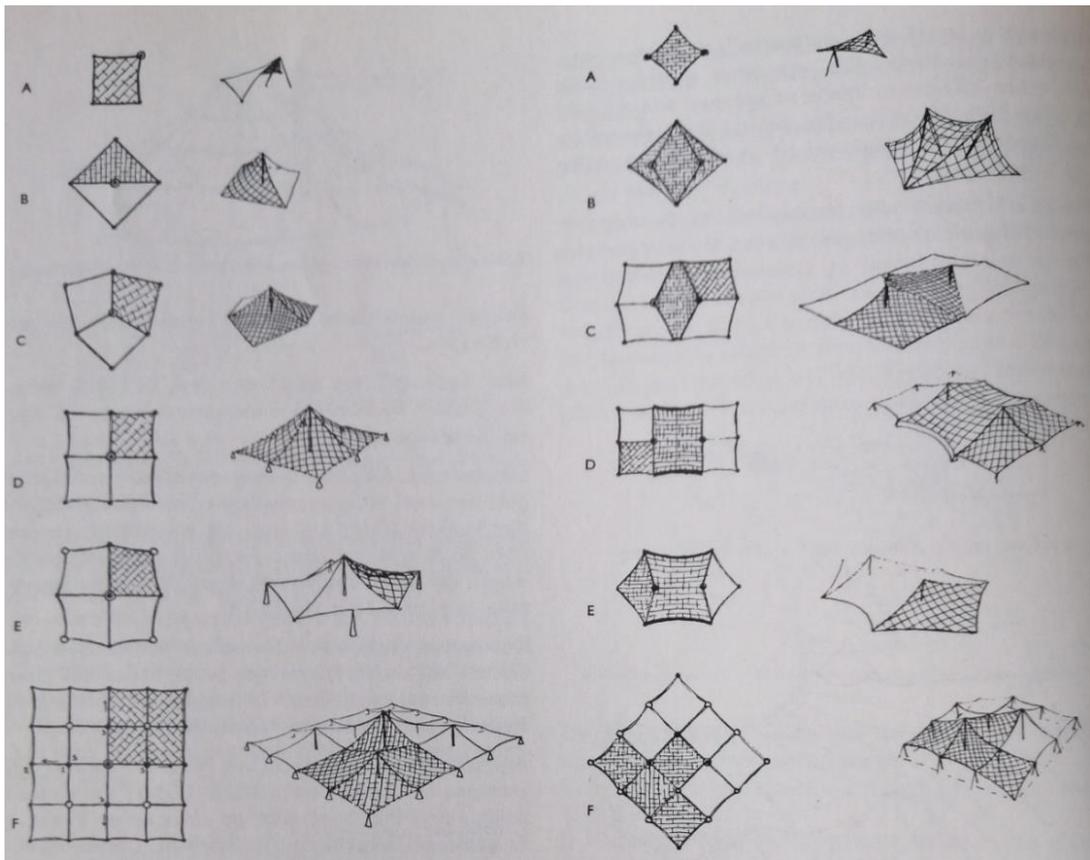
ภาพที่ 25 การทดลองการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงของไฟร โอทโท ในงานดูซชวีนินพอร์ แสดงการแบ่งพื้นที่ของผิวรับน้ำหนักออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อสังเกตพฤติกรรมของแรงกระทำ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ในเชิงโครงสร้างผ่านอโมเมนต์ต่อไป

ที่มา: Frei Otto, 1954: 107

เมื่อศึกษาจนสามารถสร้างรูปทรงจากรูปการใช้ผ้าใบเพื่อรับแรงดึงได้แล้ว โอทโทยังได้ทำการพัฒนาโครงสร้างชนิดนี้ให้มีความซับซ้อนขึ้นด้วยการผสมผสานชิ้นส่วนรับแรงอัดที่จำเป็นเข้าไป มีการพัฒนาองค์ประกอบของโครงสร้างไม้และเหล็กเพื่อประกอบการรับผืนผ้าใบ รวมถึงพยายามหาวิธีคำนวณแรงกระทำที่เกิดขึ้นในโครงสร้างด้วย

โอทโท ได้ทำการศึกษาเชิงลึกมากขึ้น จนกระทั่งถึงเรื่องการยึด การเชื่อมต่อ และได้ออกแบบจุดเชื่อมต่อในโครงสร้างและแนะนำเทคนิคเบื้องต้นที่มีความเป็นไปได้ไว้ ในตอนท้ายของการศึกษา โอทโทได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของหุ่นจำลองของการรับแรงกระทำในโครงสร้าง

กล่าวคือ เมื่อเราออกแบบรูปทรงของโครงสร้างรับแรงดึง แล้วทำการพลิกกลับด้านโครงสร้างนั้น พฤติกรรมของแรงกระทำในโครงสร้างจากแรงดึง จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงอัดแทน นั้นทำให้นำไปสู่การปรับเปลี่ยนวัสดุสำหรับโครงสร้าง จากวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึง เช่น เชือก หรือผ้าใบ ไปสู่การใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงอัด เช่น คอนกรีต แทน ความเข้าใจนี้สามารถช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนงานออกแบบโครงสร้างได้มากขึ้น



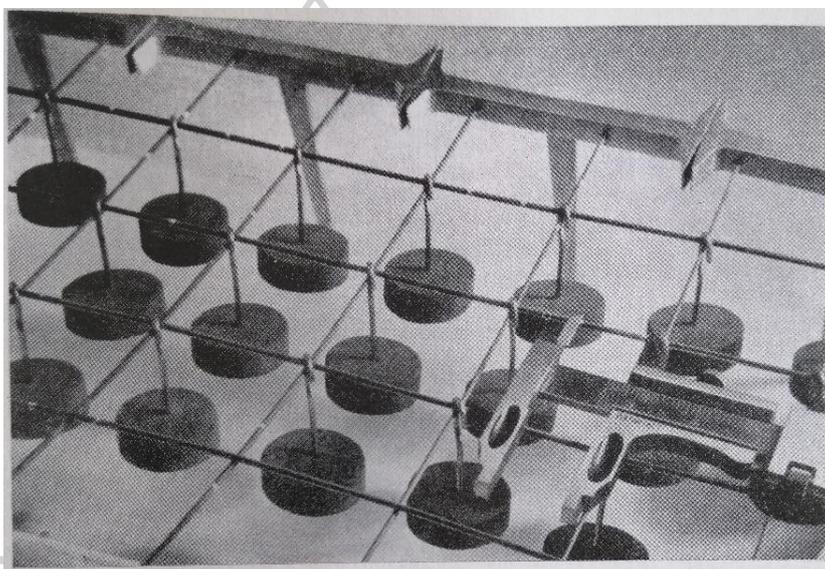
ภาพที่ 26 รูปแบบหน่วยย่อยของโครงสร้างรับแรงดึงและการประกอบ

ที่มา: Frei Otto, 1954: 54

งานดุษฎีนิพนธ์ชิ้นนี้มีความพยายามจะพิสูจน์และนำเสนอความเป็นไปได้ในการใช้ผ้าใบเพื่อสร้างเป็นโครงสร้างรับแรงดึง ด้วยการศึกษาเรื่องความแข็งแรงของโครงสร้างผ่านการทำหุ่นจำลอง วัสดุระยะ ขนาด แล้วนำมาคำนวณ นอกจากนั้นยังมีรายละเอียดการคำนวณแรงกระทำภายนอกอื่น ๆ อีก เช่น แรงลม แรงกระทำจากหิมะ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักของสายเคเบิลประเภทต่าง ๆ การศึกษาทดลองเหล่านี้เป็นสิ่งใหม่มากในช่วงเวลาขณะนั้น เนื่องจากวิศวกรทั่วไปต่างยังไม่เคยมีประสบการณ์ในการออกแบบและก่อสร้าง

อาคารที่มีลักษณะเช่นนี้มาก่อน โอทโทจึงจ้องพยายามออกแบบเครื่องมือในการวัดจากการประยุกต์เครื่องมือพื้นฐานที่มี ต่อมาวิธีการทดลองและเครื่องมือที่ใช้กับหุ่นจำลองเหล่านี้เองได้ถูกพัฒนาและกลายเป็นแนวทางในการศึกษาและทดลองในงานต่าง ๆ ของโอทโท ที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาที่ซตุทการ์ท

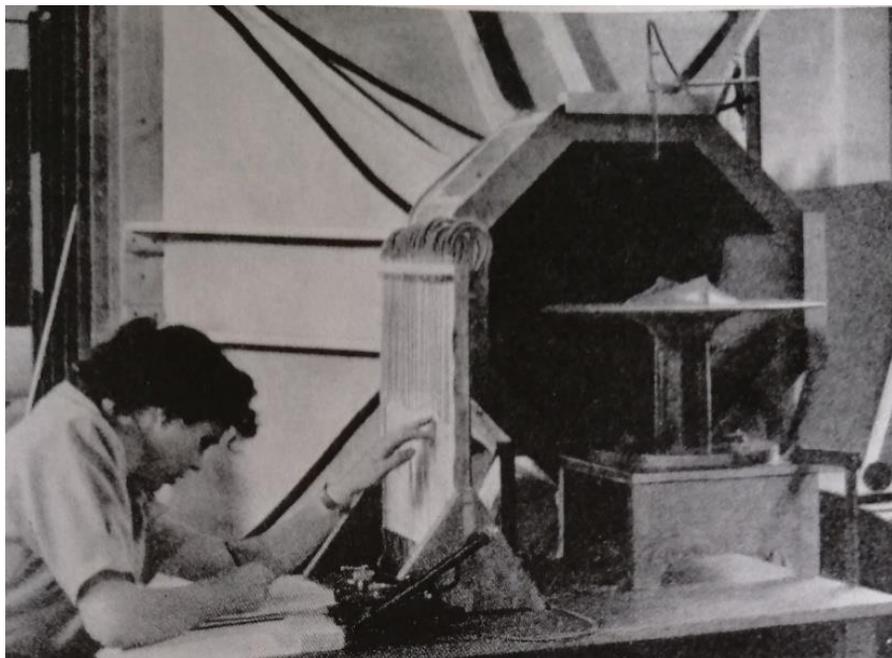
ในตอนท้ายของงานชิ้นนี้ โอทโท ได้เสนอแนะงานออกแบบโครงการต่าง ๆ ที่เขาคิดว่าสามารถใช้โครงสร้างรับแรงดึงของเขาได้ เช่น บ้านพักอาศัย สนามกีฬา อาคารโรงจอดเก็บเครื่องบิน โบสถ์ โรงอุปรากร หรือการสร้างหลังคาขนาดใหญ่ครอบคลุมเมือง



ภาพที่ 27 การแขวนน้ำหนักที่หุ่นจำลองโครงสร้างรับแรงดึง ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในระบบของโครงข่ายตาตาราง และการวัดระยะด้วยเครื่องมือวัดละเอียด (vernier caliper) เพื่อให้ได้ค่าที่มีความละเอียดสูง

ที่มา: Frei Otto, 1954: 85

โอทโทยังได้เสนอแนะวิธีการปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างจากผืนผ้าใบเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ด้วย ซึ่งนั่นทำให้เรามองเห็นความสัมพันธ์ของแรงอัดและแรงดึงในการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งแสดงความเป็นไปได้และรายละเอียดในการก่อสร้างโครงสร้างเปลือกบางมากยิ่งขึ้นด้วย



ภาพที่ 28 การวิเคราะห์แรงกระทำที่หุ่นจำลองในอุโมงค์ลม

ที่มา: Frei Otto, 1954: 107

โอทโทได้สรุปผลการศึกษาของเขาทั้งหมดโดยชี้ให้เห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่เราจะเปลี่ยนวิธีการออกแบบโดยเปลี่ยนวิธีการในการรับแรงของโครงสร้าง จากโครงสร้างรับแรงอัดที่ใช้โดยทั่วไปมาเป็นโครงสร้างรับแรงดึง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับโครงการออกแบบได้ทุกประเภทอาคาร ซึ่งด้วยวิธีการใหม่นี้จะช่วยให้เราใช้วัสดุก่อสร้างน้อยลง บริโภคพลังงานน้อยลง ซึ่งเป็นสิ่งที่นักออกแบบควรหันมาให้ความสนใจ

“หลังการรับแรงดึงคือเมมเบรนที่ถูกยึดไว้ด้วยการดึงระหว่างจุดสองจุดที่วางอยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งตัวแผ่นเมมเบรนนี้จะทำหน้าที่เป็นทั้งหลังคาคลุมพื้นที่และเป็นโครงสร้างในคราวเดียวกัน น้ำหนักกระทำจะเกิดที่ผิวของเมมเบรนหลังคานี้ โดยจะมีเฉพาะแรงดึงเท่านั้น โดยที่ตัวเมมเบรนจะมีลักษณะโค้งอย่างน้อยหนึ่งด้าน (sag) โครงหลังการรับแรงดึงนี้จะมีแตกต่างจากโครงสร้างเปลือกบางที่รับแรงอัด การโก่งเดาะจะเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเปลือกบาง แต่จะไม่เกิดขึ้นในโครงสร้างรับแรงดึง หัวใจสำคัญสำหรับโครงสร้างรับแรงดึงที่เป็นต้นตอคือการใช้ผ้าใบรับแรงดึงหรือเส้นใยโลหะเป็นวัสดุหลังคา เพราะมันเป็นวัสดุที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับโครงตาข่ายเคเบิล ที่ต้องมีการใส่วัสดุหลังคาแยกอีกชั้นหนึ่ง ในกรณีที่ใช้โครงสร้างเคเบิล แล้วมีการดึงในทิศทางหนึ่ง ส่วนอีกทิศทางหนึ่งนำเอาคานซึ่งรับน้ำหนักต่อเนื่องมาวางซ้อน เราก็จะได้โครงสร้างที่เรียกว่า โครงตาข่ายคาน

(girder net) สำหรับโครงสร้างหลังคารับแรงดึงที่มีลักษณะแบนราบนั้น สามารถทำได้โดยการดึงสายเคเบิลในแนวระดับ แรงดึงที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดระนาบแบนแทนที่จะเป็นส่วนโค้ง (curvature)”

(Frei Otto, 1954: 158)

2.4 หลักการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึง

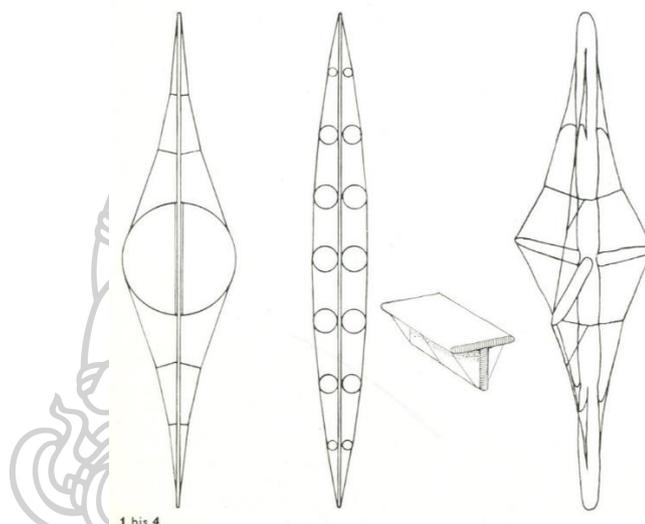
หลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกแล้ว ไพร โอทโท ได้นำเอาความรู้ที่ได้ศึกษาไว้มาทำงานออกแบบจริง โดยระยะแรกได้เปิดสำนักงานออกแบบส่วนตัวของตนเองที่เบอร์ลิน ต่อมาได้ย้ายไปสอนหนังสือและก่อตั้งสถาบันการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงที่ซตุทการ์ท โอทโทได้สรุปความรู้และเขียนเป็นหนังสือเรื่อง โครงสร้างรับแรงดึง (Zugbeanspruchte Konstruktionen) ขึ้นเพื่ออธิบายหลักการออกแบบและการคำนวณโครงสร้างรับแรงดึงอย่างเป็นระบบ

หนังสือชุดนี้แบ่งออกเป็นสองเล่มตามลักษณะของโครงสร้างที่มีความแตกต่างกัน โดยโอทโทเลือกที่จะเขียนเรื่องโครงสร้างรับแรงดึงประเภทอัดอากาศ (Pneumatic) เป็นเล่มแรก ซึ่งตีพิมพ์ในปี 1962 และในปี ค.ศ. 1966 ได้ตีพิมพ์เล่มที่สองซึ่งเป็นโครงสร้างเคเบิล ตาข่าย และผ้าใบ (cables, net, membrane)



ภาพที่ 29 หนังสือโครงสร้างรับแรงดึง (Zugbeanspruchte Konstruktionen) เล่มที่ 1 (ซ้ายมือ) และเล่มที่ 2 (ขวามือ)

สำหรับเนื้อหาในเล่มแรกนั้น โอทโทได้แบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ส่วนแรกเป็นการปูพื้นฐานเรื่องทั่วไปเกี่ยวกับระบบของโครงสร้างอัดอากาศ ซึ่งแรงดึงที่ผิวของดครงสร้างจะเกิดจากมวลอากาศหรือของเหลวที่ถูกบรรจุอยู่ภายใน ส่วนที่สองเป็นการแสดงวิธีการคำนวณแรงกระทำในโครงสร้างอย่างละเอียด โดยมีวิศวกรชื่อ รูดอล์ฟ โทรสเทล (Rudolf Trostel) เป็นผู้แสดงตัวอย่างการคำนวณ ในส่วนสุดท้ายเป็นการนำเสนอความเป็นไปได้และความท้าทายใหม่ในการใช้โครงสร้างอัดอากาศ โดยมีประเด็นสำคัญในเรื่องการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้างสู่ฐานราก ซึ่งโอทโทพยายามเสนอให้ออกแบบโครงสร้างอัดอากาศซึ่งมีน้ำหนักน้อยมาก แล้วให้ถ่ายน้ำหนักนี้ลงสู่โครงสร้างฐานรากโดยผ่านองค์ประกอบทางโครงสร้างขนาดเล็กและเบา เช่น ตะขอ หรือสมอขนาดเล็ก

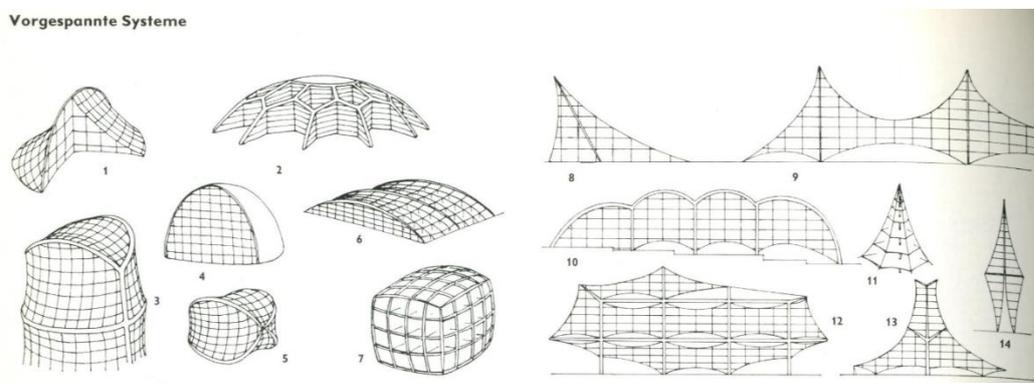


ภาพที่ 30 การผานระบบโครงสร้างเคเบิลกับระบบอัดอากาศ
ที่มา: Frei Otto, Rudolf Trostel, 1962: 148

สำหรับเล่มที่สอง โอทโทนำเสนอเนื้อหาสองส่วน ส่วนแรกเป็นการนำเสนอข้อมูลเบื้องต้นของพฤติกรรมของแรงกระทำในโครงสร้างรับแรงดึงประเภทเคเบิล ตาข่าย และผ้าใบ โดยโอทโทได้นำเสนอผ่านกรณีศึกษาประกอบ ในเล่มที่สองนี้ โอทโทได้ขยายความถึงการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงชนิดใส่แรงกระทำ (prestressed) คือการทำให้เกิดแรงดึงที่วัสดุก่อนจะใช้งาน และไม่ใส่แรงกระทำ (non prestressed) คือการปล่อยให้น้ำหนักหรือแรงกระทำกระทำกับโครงสร้างไว้ด้วย ในส่วนที่สองของเนื้อหา โอทโท ได้รับการช่วยเหลือจากวิศวกร ชื่อ ฟรีดริช-คาร์ล ชเลเยอร์ (Friedrich-Karl Schleyer) เป็นผู้วิเคราะห์และคำนวณโครงสร้างสามชนิดย่อยดังกล่าว

จึงอาจกล่าวได้ว่า หนังสือทั้งสองเล่มนี้คือคู่มือการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงที่มีความครบถ้วนสมบูรณ์มาก ทั้งเนื้อหาทางด้านความรู้พื้นฐานของโครงสร้าง พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง การออกแบบ การคำนวณ การวิเคราะห์โครงสร้าง และรายละเอียดสำหรับการก่อสร้าง และเป็น

หนังสือที่ไม่เคยมีมาก่อน เพราะหนังสือเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงซึ่งเขียนโดยวิศวกรในสมัยก่อนหน้าจะมีเพียงเนื้อหาที่กล่าวถึงการออกแบบสะพานเป็นหลัก



ภาพที่ 31 ระบบโครงสร้างรับแรงดึงชนิดใส่แรงกระทำ

ที่มา: Frei Otto, Friedrich-Karl Schleyer, 1966: 94

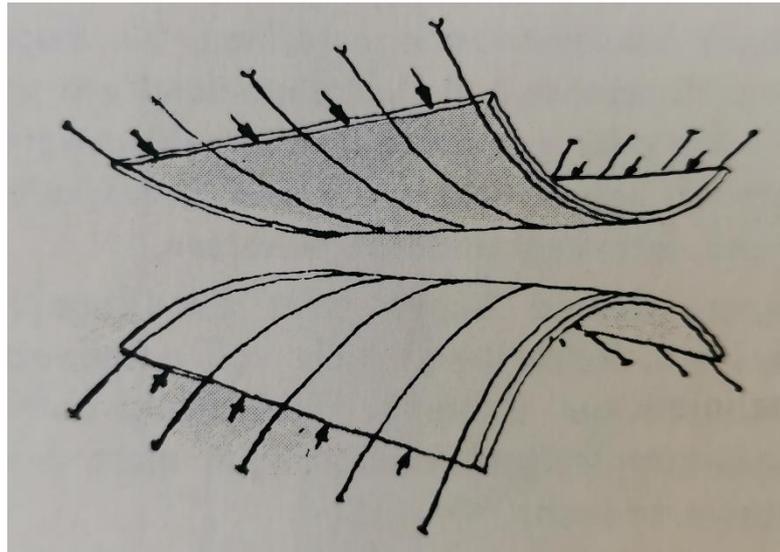
หนังสือการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงทั้งสองเล่มนี้ ได้รับการตีพิมพ์ทั้งในภาษาเยอรมันและฉบับภาษาอังกฤษ ซึ่งตีพิมพ์โดยสำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (The MIT Press) ทำให้การออกแบบโครงสร้างรับแรงดึง ผลงานของไฟร โอทโท และชื่อเสียงของเขากลายเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในระดับนานาชาติ

2.5 Finding form

หลังจากศึกษา ทดลอง และออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงอย่างต่อเนื่องกว่า 40 ปี ไฟร โอทโท จึงได้รับรางวัล Deutscher Werkbund Bayern Prize ในปี ค.ศ. 1992 ซึ่งจัดขึ้นโดย Deutscher Werkbund Bayern ที่เมืองมิวนิก ในโอกาสรับรางวัลดังกล่าว ทางผู้จัดได้ตีพิมพ์หนังสือรวบรวมการศึกษา ทดลอง และผลงานออกแบบบางส่วนของไฟร โอทโทเพื่อประกอบการจัดแสดงผลงานของเขา ภายใต้ชื่อ “Gestalt finden: Auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen” หรือในชื่อภาษาอังกฤษ “Form finding: Towards an architecture of the minimal” ซึ่งได้กลายเป็นสื่อที่เผยแพร่แนวคิดและผลงานของไฟร โอทโทให้เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมากขึ้น

หนังสือเล่มนี้แสดงภาพรวมการศึกษาและทดลองทั้งหมดของไฟร โอทโท ซึ่งสรุปโดยลูกศิษย์ผู้ทำงานใกล้ชิดกับไฟร โอทโทมาเป็นเวลานาน ในเนื้อหามีการใช้คำว่า Gestalt finden หรือ Finding form และคำว่า Natürliche Konstruktionen หรือ natural construction เพื่ออ้างถึงแนวคิดและวิธีการในการออกแบบรูปทรงสามมิติของไฟร โอทโท และนำเสนอภาพรวมของตัวอย่างการทดลองในการออกแบบโครงสร้างส่วนที่สำคัญๆของไฟร โอทโท โดยแบ่งรายละเอียดออกเป็นบท ทำให้

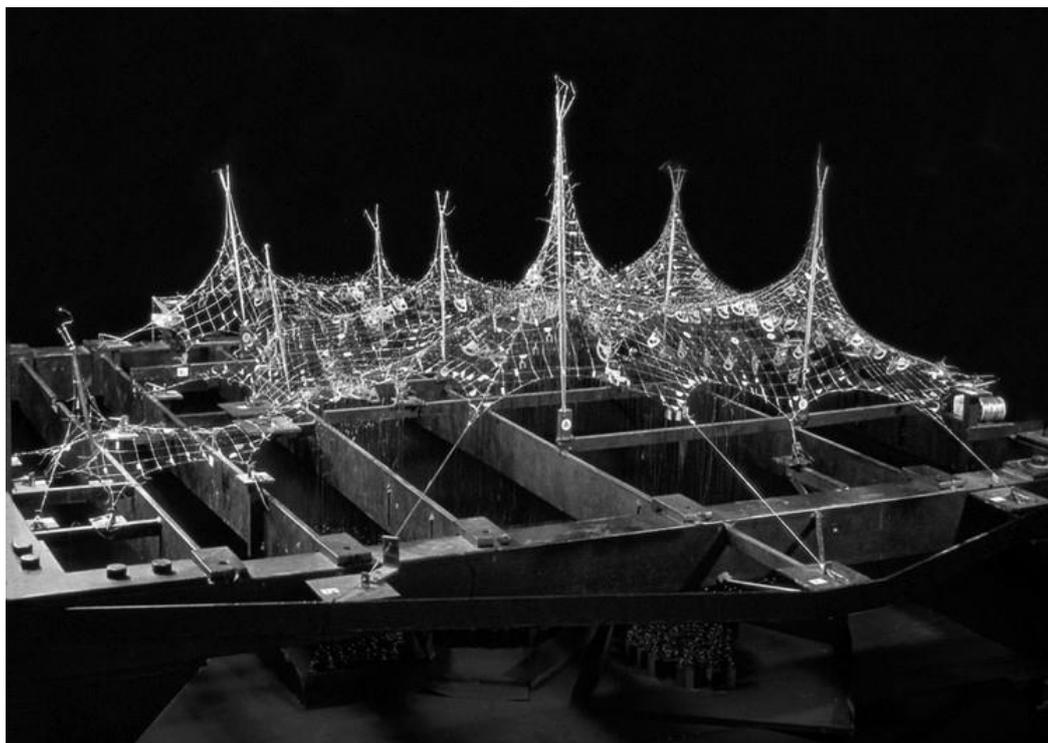
เห็นรายละเอียดที่เป็นภาพย่อยของการทดลองออกแบบโครงสร้างในรูปแบบต่าง ๆ เช่น โครงสร้างผ้าใบ โครงสร้างแบบชาย โครงสร้างโค้ง (arch) ประทุน (vault) และโครงสร้างเปลือกบาง (shells) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเนื้อหาส่วนที่ว่าด้วยเรื่องการใช้พลังงานในอาคาร และโครงสร้างที่สามารถขยับได้ (convertible) ด้วย



ภาพที่ 32 แสดงการสลับพฤติกรรมในการรับแรงกระทำของโครงสร้างจากการรับแรงดึง (บน) และการรับแรงอัด (ล่าง) ซึ่งเกิดขึ้นในรูปทรงของโครงสร้างเดิมที่กลับด้านกันเท่านั้น

ที่มา: Frei Otto, 1954: 154





ภาพที่ 33 การทดลองโครงสร้างรับแรงดึงของไฟร โอทโท ในโครงการออกแบบหลังคาสนามกีฬา
โอลิมปิก ที่เมืองมิวนิค
ที่มา: Frei Otto, 1995: 96

จากเอกสารเบื้องต้นที่ศึกษาพบว่า ไฟร โอทโท ได้เสนอแนวคิดในการออกแบบโครงสร้าง
สำหรับงานสถาปัตยกรรมแบบใหม่ โดยเสนอแนะความเป็นไปได้ในกระบวนการออกแบบ การ
ก่อสร้าง และงานเชิงวิศวกรรมโดยละเอียดพอสมควร อย่างไรก็ตาม วรรณกรรมโดยส่วนใหญ่เน้น
มุ่งเน้นให้ข้อมูลเชิงเทคนิคเป็นหลัก และมักกล่าวถึงแนวความคิดไว้เพียงเล็กน้อย แม้หนังสือ
“Gestalt finden: Auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen” จะพยายามกล่าว
ภาพรวมของการออกแบบโดยสรุป แต่ก็ได้รายละเอียดที่ไม่ครบถ้วน และเน้นกระบวนการทดลองเป็น
หลัก นอกจากนี้พบว่าการบัญญัติคำใหม่ขึ้นคือคำว่า Gestalt finden หรือ Finding form ซึ่งเป็น
คำที่นักออกแบบและนักวิชาการนำมาใช้พัฒนาต่อยอดอีกมากมาย อย่างไรก็ตามการทำความเข้าใจ
แนวคิดและกระบวนการออกแบบของโอทโทนั้น ยังจำเป็นต้องศึกษางานส่วนอื่น ๆ ประกอบอีก คือ
ผลงานออกแบบและการศึกษาวิจัยของเขา ซึ่งจะได้นำเสนอในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

สองบทบาทในการทำงานของ ไฟร โอทโท

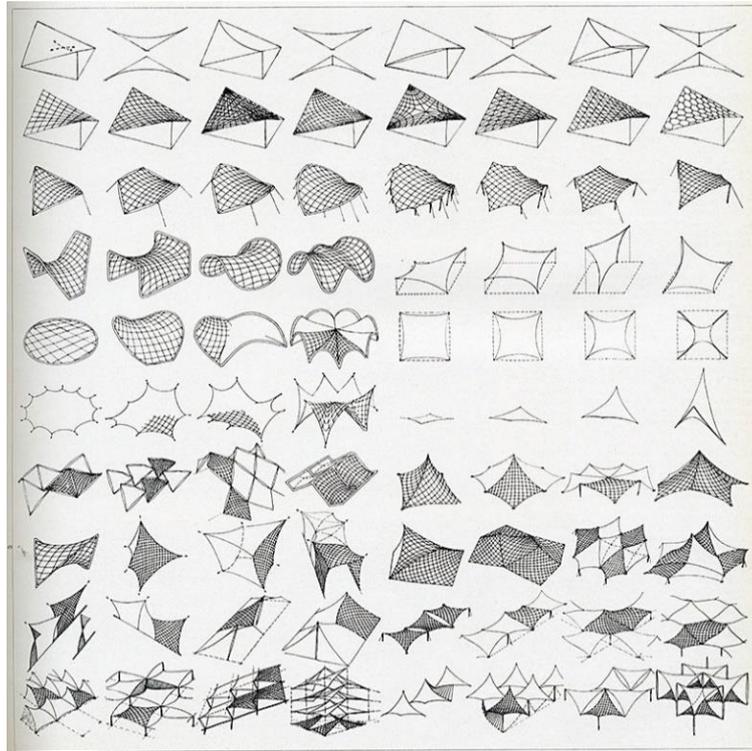
เพื่อให้การทำความเข้าใจแนวคิดและกระบวนการออกแบบของไฟร โอทโท ให้ชัดเจน ผู้ศึกษาจึงได้ค้นคว้าเอกสารเพิ่มเติมจากเอกสารเบื้องต้นที่ศึกษามาก่อนหน้านี้ โดยทำการศึกษาผ่านผลงานการออกแบบและการศึกษาวิจัย รวมถึงงานทดลองของไฟร โอทโท ในช่วงระยะเวลาหลังจากจบการศึกษาระดับปริญญาเอกแล้ว จนกระทั่งเสียชีวิตในปี ค.ศ. 2015

3.1 การทำงานในฐานะนักออกแบบ

3.1.1 นักออกแบบโครงสร้างเต็นท์ผ้าใบ

ด้วยความสัมพันธ์กับเพเทอร์ ชโตรเมเยอร์ (Peter Stromeyer) ซึ่งช่วยเหลือทางด้านข้อมูลเรื่องโครงสร้างเต็นท์ผ้าใบให้กับโอทโทมาตั้งแต่ช่วงที่เขากำลังศึกษาปริญญาเอก เมื่อโอทโทจบการศึกษาแล้ว ทั้งสองคนจึงได้ร่วมกันพัฒนาวิธีการออกแบบและการก่อสร้างเต็นท์ที่มีความทันสมัยและน่าสนใจมากขึ้น เห็นได้จากผลงานการออกแบบของโอทโทซึ่งถูกรวบรวมไว้เป็นหนังสือรวมผลงานของบริษัทโครงสร้างเต็นท์ของชโตรเมเยอร์ชื่อ Stromeyer: ein Begriff für leichte Flächentragwerke หรือ คู่มือการออกแบบโครงสร้างผ้าใบโดยบริษัทชโตรเมเยอร์ ซึ่งตีพิมพ์ในปี ค.ศ.1968

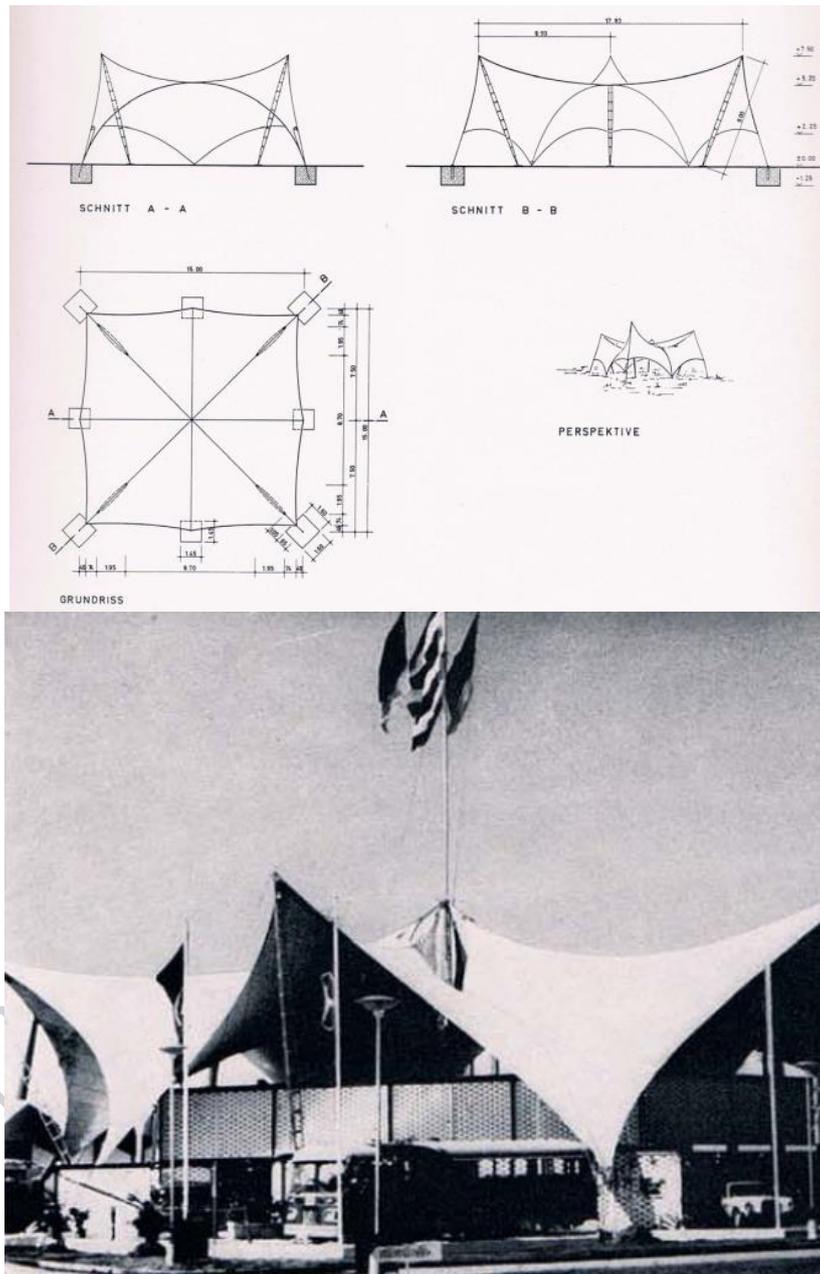




ภาพที่ 34 ลักษณะโครงสร้างผ้าใบแบบต่าง ๆ ที่ไฟร โอทโท ประมวลไว้

ที่มา: Frei Otto, 1968: 1

นอกจากหนังสือเล่มนี้จะทำหน้าที่เสมือนแคตตาล็อกโครงสร้างผ้าใบของชโตรเมเยอร์แล้วยังช่วยสร้างความมั่นใจในความเป็นไปได้ของการออกแบบโครงสร้างผ้าใบในรูปลักษณะต่าง ๆ ซึ่งมีไฟร โอทโท เป็นผู้ออกแบบด้วย ในเล่มมีการแบ่งประเภทของรูปแบบโครงสร้างผ้าใบออกเป็น 6 ประเภท มีการให้ข้อมูลขนาดและระยะต่าง ๆ เป็นแบบรูปทางสถาปัตยกรรม และอ้างอิงถึงการก่อสร้างจริงในพื้นที่หลาย ๆ แห่งทั่วโลก รวมถึงการก่อสร้างศาลาเยอรมันในงานแสดงสินค้าที่กรุงเทพมหานครเมื่อปี ค.ศ.1966 ด้วย



ภาพที่ 35 แบบสถาปัตยกรรมและภาพถ่ายอาคารศาลาเยอรมันที่กรุงเทพมหานคร เมื่อปี ค.ศ.1966
ที่มา: Frei Otto, 1968: 13-14



ภาพที่ 36 เวทีในงานสวนแห่งชาติ เมืองโคโลญจน์ 1957 Tanzbrunnen เป็นเวทีชั่วคราวสำหรับแสดงดนตรีและงานเต้นรำในช่วงฤดูร้อน แม้จะผ่านเวลามานานหลายสิบปี แต่อาคารหลังนี้ก็ยังคงตั้งอยู่ ณ สถานที่นี้ กลายเป็นจุดสังเกตสำคัญหนึ่งของเมืองโคโลญจน์

ที่มา: http://derarchitektbda.de/forscher-und-formfinder/frei-otto_bundesgartenschau-1957_02_tanzbrunnen_koeln-1957_foto-atelier-frei-otto-warmbronn/

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างโครงตาข่าย (cable net)

3.1.2.1 ศาลาเยอรมันที่เมืองมอนทรีออล ค.ศ.1967

ไฟร โอทโท สนใจการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงที่มีพื้นฐานจากรูปแบบโครงตาข่ายมาแต่เดิม สังเกตได้จากการใช้แนวคิดนี้ในงานเขียนดุษฎีนิพนธ์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1954 เป็นต้นมา เมื่อได้โอกาสเหมาะสมไฟรโอทโทได้ใช้แนวคิดนี้ในการประกวดออกแบบศาลาเยอรมัน สำหรับก่อสร้างในงานแสดงสินค้านานาชาติที่เมืองมอนทรีออล ประเทศแคนาดา ในปี ค.ศ.1967 โดยเป็นการทำงานร่วมกับสถาปนิกเยอรมันอีกคนหนึ่ง ชื่อ โรล์ฟ กูทโบรด (Rolf Gutbrod) ก่อสร้างโดยบริษัทชไตร์เมเยอร์



ภาพที่ 37 ศาลาเยอรมัน ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ เมืองมอนทรีออล แคนาดา

ที่มา: <https://www.gettyimages.com/>

สำหรับโครงสร้างประเภทโครงตาข่ายนี้ จะมีความแตกต่างจากโครงสร้างผ้าใบในส่วนของ การแยกระนาบของเคเบิลรับแรงดึงกับผิวปิดหลังคาออกจากกันอย่างชัดเจน เนื่องจากข้อจำกัดของ ความแข็งแรงของวัสดุผ้าใบในขณะนั้นไม่สามารถใช้ในการเป็นระนาบปิดหลังคาขนาดใหญ่ มาก ๆ ได้ โอทโทจึงเลือกใช้เคเบิลสานกันเป็นโครงข่ายตารางกริด เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรับแรงดึงก่อน จากนั้นจึง นำผืนผ้าใบมายึดติดกับโครงตาข่ายเคเบิลนี้



ภาพที่ 38 ศาลาเออร์มัน ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ เมืองมอนทรีออล แคนาดา

ที่มา: <https://www.archdaily.com/>

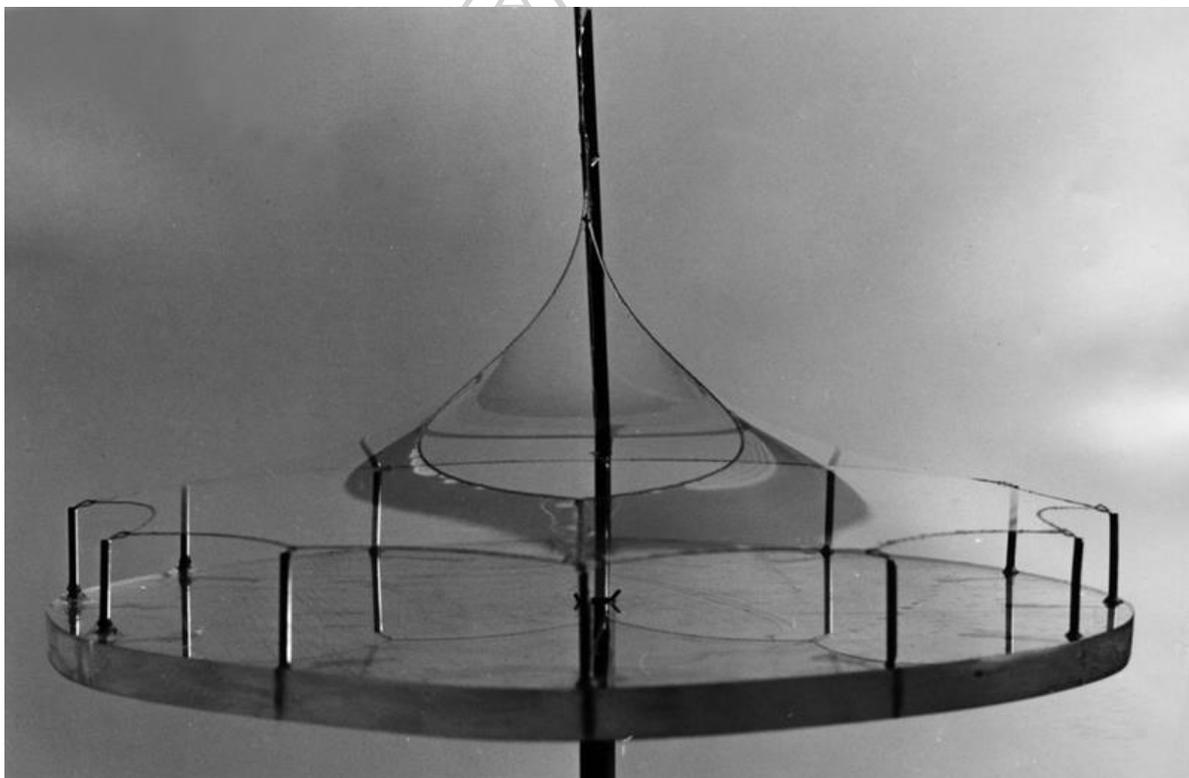
สำหรับการออกแบบโครงสร้างนี้ นับเป็นครั้งแรกของโลก หลังจากทดลองด้วยการใช้ฟิล์มสปู การทำหุ่นจำลองด้วยไม้ หรือวิธีการอื่นๆแล้ว โอทโทได้ทดลองสร้างรูปทรงจากการทำหุ่นจำลองขนาดมาตราส่วน 1: 75 ด้วยการใช้เคเบิลโลหะ เพื่อจะทำการถ่ายภาพและวัดระยะ ณ จุดตัดทุกจุด (Axel Menges, 1995: 94-101) โดยเป็นการนำเอาหลักการของ catenary curve ซึ่งเป็นการใช้หลักการทางฟิสิกส์ของการนำเชือกมาแขวนกับจุดยึดที่ปลายทั้งสองด้าน แล้วปล่อยให้แรงโน้มถ่วงของโลกทำงานร่วมกับน้ำหนักตัวของเส้นเชือกนั้น จะเกิดปรากฏการณ์การก่อรูปตัวเองเป็นเส้นโค้งตามธรรมชาติ หลักการนี้มีพัฒนาการโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ ธอมัส ฮุก (Thomas Hooke) และในสมัยต้นศตวรรษที่ 20 มีสถาปนิกชาวสเปนได้ทดลองใช้วิธีการนี้ในการทดลองสร้างรูปทรงของโบสถ์มาแล้ว คือ แอนโทนี เกาดี้ (Antoni Gaudi) อย่างไรก็ตามวิธีการของเกาดี้ต่างออกไปตรงที่มีการแขวนถ่วงน้ำหนักทรายที่เส้นเชือก ทำให้รูปร่างของเส้นโครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะปลายแหลม และไม่ปฏิบัติตามกฎของฮุก (Hooke's law) (Sippawich Kambung, 2019: 62)



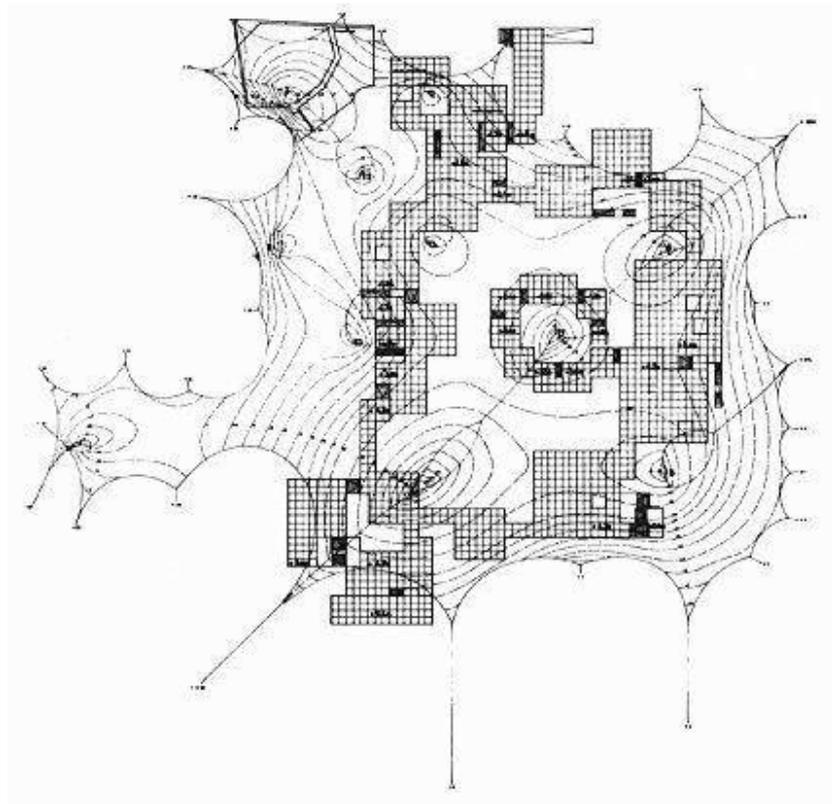
ภาพที่ 39 ภายในศาลาเยอรมัน ที่เอ็กซ์โปมุนิฮัล

ที่มา: <https://www.archdaily.com/623689/ad-classics-german-pavilion-expo-67-frei-otto-and-rolf-gutbrod>

ในปี ค.ศ. 1966 โอทโท และทีมงานได้ทดลองสร้างหุ่นจำลองขนาดใหญ่ขึ้นที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของเขา โดยมีขนาดย่อลงมาจากอาคารจริง 17 ส่วน เพื่อจะทำการทดลองสร้างและปรับแต่งรายละเอียดต่าง ๆ ของโครงสร้าง อาคารจำลองนี้มีขนาด 460 ตารางเมตร มีการเตรียมโครงตาข่ายเคเบิลจากโรงงาน นำมายึดเข้ากับจุดยึดที่มุมต่าง ๆ จากนั้นใช้รถเครนยกเสาขึ้นตั้งเพื่อยึดจุดยึดที่ด้านบน ทำให้เกิดเป็นรูปทรงของโครงตาข่ายเคเบิลรับแรงดึงขึ้น จากนั้นจึงนำเอาผ้าใบมาประกอบเป็นวัสดุหลังคา หลังจากติดตั้งเรียบร้อยแล้วเป็นเวลาสองปี โครงตาข่ายชุดนี้ถูกรื้อย้ายไปยังที่ตั้งที่ห่างออกไปอีก 2 กิโลเมตร และถูกสร้างขึ้นใหม่อีกครั้งเพื่อใช้เป็นอาคารของสถาบันโครงสร้างเบา (Axel Menges, 1995: 102) ซึ่งยังคงเป็นอาคารที่มีการใช้งานได้ตามปกติจนถึงปัจจุบันนี้

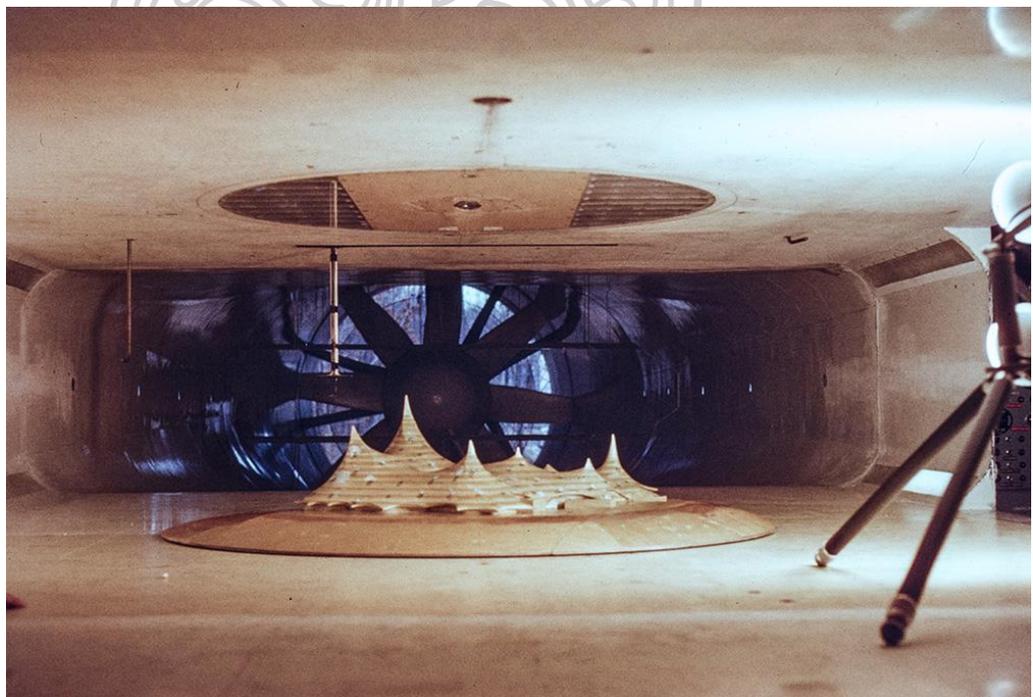


ภาพที่ 40 หุ่นจำลองศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีออล ทำจากฟิล์มสบู่
ที่มา: <https://www.detail.de/artikel/forschen-entwickeln-wagen-pritzker-preis-fuer-frei-otto-13459/>



ภาพที่ 41 ผังหลังคาศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีออล

ที่มา: <https://i.pinimg.com/>



ภาพที่ 42 การทดสอบหุ่นจำลองไม้ในอุโมงค์ลม

ที่มา: <https://www.architectsjournal.co.uk/>



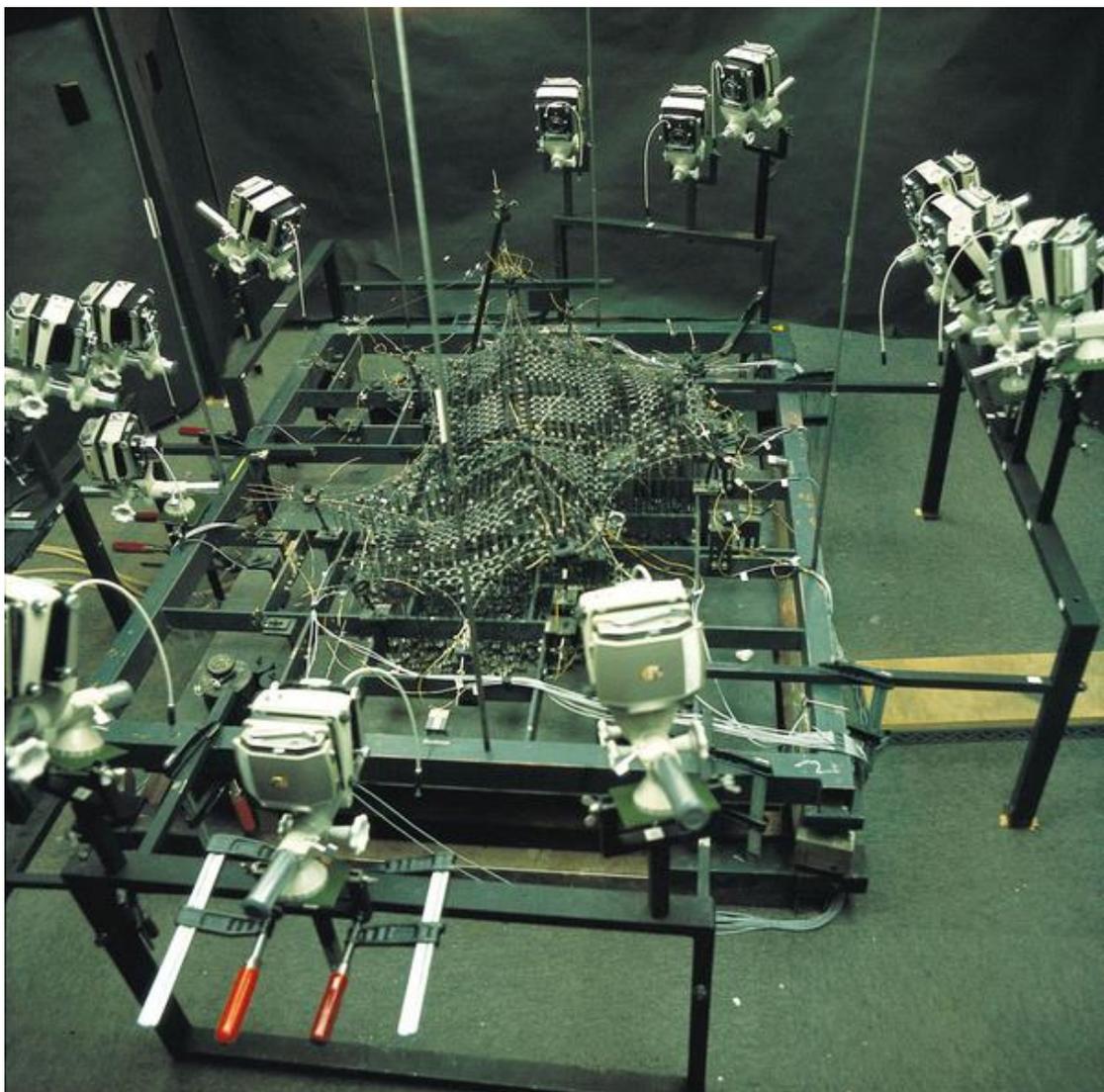
ภาพที่ 43 การสร้างหุ่นจำลองโครงสร้างศาลาเยอรมันสำหรับทดสอบก่อนสร้างจริง
ที่มา: <https://www.architectsjournal.co.uk/news/the-ajs-12-days-of-christmas-frei-otto>



ภาพที่ 44 อาคารสถาบันออกแบบโครงสร้างเบาซึ่งสร้างขึ้นจากหุ่นจำลองโครงสร้างศาลาเยอรมัน
ที่มา: <https://www.architectsjournal.co.uk/news/the-ajs-12-days-of-christmas-frei-otto>

3.1.2.2 สนามกีฬาโอลิมปิก เมืองมิวนิก ค.ศ.1972

หลังจากที่ได้ออกแบบศาลาเยอรมันที่เมืองมอนทรีออล เมื่อปี ค.ศ.1967 ด้วยเทคนิคของการใช้ระบบโครงสร้างลักษณะโครงตาข่ายเคเบิลรับแรงดึงแล้ว ถัดมาในปี ค.ศ.1968 ไพร โอทโท ได้รับคำเชิญจากสถาปนิกกินเธอร์ เบห์นิช (Günther Behnisch) ให้เข้าร่วมเป็นที่ปรึกษาในการออกแบบโครงสร้างหลังคาสำหรับสนามกีฬาโอลิมปิก ที่เมืองมิวนิก ซึ่งเป็นการออกแบบที่ต้องใช้เทคนิคแบบเดียวกันสำหรับการก่อสร้างโครงหลังคารับแรงดึงเพื่อครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่



ภาพที่ 45 หุ่นจำลองของโครงหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่เมืองมิวนิกและอุปกรณ์การวัดค่าต่าง ๆ

ที่มา: <https://www.detail-online.com/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/>



ภาพที่ 46 หุ่นจำลองในการประกวดออกแบบโครงหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่เมืองมิวนิก

ที่มา: <https://www.detail.de/article/research-development-and-daring-frei-otto-wins-the-pritzker-prize-26524/>

สำหรับการออกแบบโครงหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกนี้เป็นการต่อยอดจากงานศาลาเยอร์มันที่มอนทรีออล ซึ่งต้องการความละเอียดและแม่นยำในการคำนวณที่สูงมาก โอทโทและทีมงานที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของเขาต้องทดลองและทดสอบหุ่นจำลองจำนวนมาก มีการสร้างหุ่นจำลองย่อยส่วนของการก่อสร้างลงมาในสัดส่วนขนาดเล็ก แล้วมีการแขวนน้ำหนักกระทำต่าง ๆ ลงไปในหุ่นจำลอง จากนั้นถ่ายภาพนิ่งจากมุมต่าง ๆ เพื่อทำการวัดขนาดทั้งสามมิติ แล้วแปรผลค่าระยะที่ได้ไปสู่การคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้างต่อไป จากการทำงานส่วนนี้เองทำให้โอทโทและทีมงานได้พัฒนาเทคนิคการแปรผลจากหุ่นจำลองกายภาพไปสู่การคำนวณโครงสร้างที่มีความละเอียดมากขึ้น รวมถึงมีการพัฒนาเครื่องมือวัดระยะด้วย

กล่าวได้ว่า เมื่อโครงการนี้สร้างเสร็จและเปิดใช้งานในปี ค.ศ. 1972 นั้น ทำให้ชื่อเสียงของไฟร โอทโท มีชื่อเสียงมากในระดับนานาชาติ เขากลายเป็นบุคคลที่ทรงอิทธิพลมากต่อการศึกษาและออกแบบโครงสร้างเบาที่มีลักษณะพิเศษ และยังทำให้มีนักศึกษา รวมถึงนักออกแบบจากทั่วโลกมีความสนใจที่จะเข้ามาร่วมศึกษา ทดลอง ค้นคว้าร่วมกับเขาที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 47 หลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่เมืองมิวนิก

ที่มา: <https://molamicasa.com/wp-content/uploads/2016/11/4246-7312-1-pb.jpg>

3.1.3 โครงสร้างตารางเปลือกบาง (Grid shell)

ไฟร โอทโท และทีมงานได้ทดลองพัฒนาระบบการก่อสร้างอีกแบบหนึ่งขึ้นมา เป็นการต่อยอดจากการใช้โครงสร้างเคเบิลรับแรงดึงตั้งที่เด็กล้วมาแล้วก่อนหน้านี้ โดยแทนที่จะใช้ฟิล์มสบู่เป็นสื่อหรือเครื่องมือในการสร้างหุ่นจำลอง โอทโท ได้นำเอาหลักการของ catenary curve ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของเส้นโค้งที่เกิดขึ้นเมื่อนำเอาเส้นเชือกมาตรึงที่ปลายสองด้าน แล้วปล่อยให้แรงโน้มถ่วงของโลกทำงานร่วมกับน้ำหนักตัวของเส้นเชือกเอง เมื่อพลิกรูปร่างของเส้นโค้งที่ได้นี้กลับด้านในมุม 180 องศา จะได้เส้นของโครงสร้างโค้งที่รับแรงอัด ซึ่งหากใช้เชือกหลายเส้นนำมาสานกัน ก็จะได้หุ่นจำลองของโครงสร้างเปลือกบางรับแรงอัดนั่นเอง หลักการนี้ถูกคิด ทดลอง และใช้มาแล้วในอดีต เช่น งานออกแบบโบสถ์ของสถาปนิกสเปน แอนโทนี เกาดี เป็นต้น แต่โอทโทเองได้เคยให้สัมภาษณ์เกี่ยวกับเรื่องนี้ว่า เขาได้สังเกตปรากฏการณ์นี้จากประสบการณ์การทำงานในแคมป์เชลยสงคราม ก่อนที่จะทราบว่ามีคนเคยศึกษาและทดลองเรื่องนี้ไว้แล้ว (Frei Otto, Juan Maria Songel, 2010: 36-46)

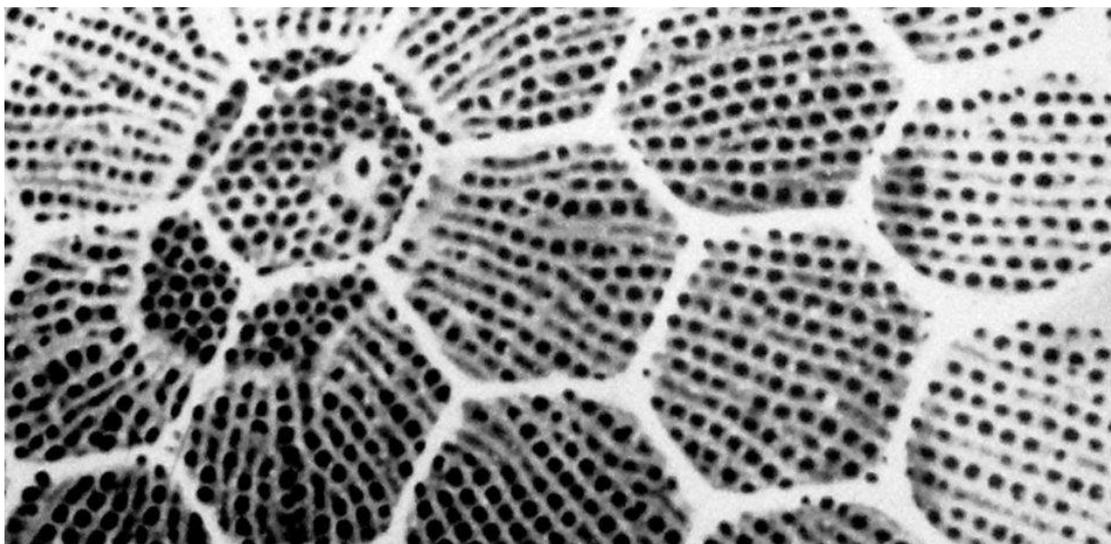


ภาพที่ 48 หุ่นจำลองจากโครงตาข่ายเชือกแขวน (hanging chain model)

ที่มา: <https://www.youtube.com/>

3.1.3.2 ศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์ (Multihalle Mannheim)

ในเรื่องของการพัฒนาโครงสร้างประเภทนี้นั้น โอทโทได้เริ่มศึกษามาตั้งแต่ปี ค.ศ.1958 โดยเริ่มทดลองศึกษาที่คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวอชิงตัน (Washington University) เมืองเซนต์หลุยส์ (St. Louis) จากนั้นในช่วงปี ค.ศ.1960-1961 ได้ถูกนำมาพัฒนาต่อที่สถาบันพัฒนาการก่อสร้างโครงสร้างเบาของเขาที่เบอร์ลิน โดยได้อัดตักนักศึกษาจากวอชิงตันซึ่งเคยทำงานทดลองร่วมกับเขา ชื่อ จอห์น โคค (John Koch) มาช่วยทำการวิจัยและพัฒนา ประกอบกับขณะนั้น โอทโทได้รับความร่วมมือจากนักชีววิทยา ชื่อ เจ. จี. เฮลมัคเค (J. G. Helmcke) ที่นำเอาภาพถ่ายของอะตอมมาให้เขาใช้ศึกษาโครงสร้างของอะตอมนับพันรูป (Philip Drew, 1976: 43-47) (Frei Otto, Juan Maria Songel, 2010: 23-24) ซึ่งโอทโทพบว่า โครงสร้างของผิวอะตอมนั้นมีลักษณะคล้ายตารางกริดที่สานกันจนกลายเป็นโครงสร้างเปลือก (grid shell) นั่นทำให้เขาสามารถนำเอาการทดลองด้วยหุ่นจำลองของคอค มาประสานกับข้อมูลโครงสร้างของอะตอมได้อย่างลงตัว และโอทโทได้ทดลองสร้างโครงสร้าง grid shell นี้ขึ้นในงานนิทรรศการงานก่อสร้างที่เมืองเอสเซน (Essen) ในปี ค.ศ.1962 เป็นโครงสร้างโดม grid shell ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เมตร สูง 5 เมตร ต่อมาได้พัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและก่อสร้างขึ้นอีกโดมหนึ่งจัดงานจัดแสดงสินค้านานาชาติที่มอนทรีออล ในปี ค.ศ. 1967 และถัดมาในปี ค.ศ.1968 ที่สวนสาธารณะ Volkspark Rehberge เบอร์ลิน (Philip Drew, 1976: 45)



ภาพที่ 49 Kieselalge, aus: J.G. Helmcke, W. Krieger, J. Gerloff. Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild © Verlag Bild und Forschung 1962, Berlin
<https://www.smb.museum/>

ในปี ค.ศ.1971 ไพร์ โอทโท ร่วมกับสถาปนิก คาร์ลฟรีด มุทชเลอร์ (Carlfried Mutschler) ออกแบบอาคารศาลาเอนกประสงค์เพื่อประกอบในงานจัดแสดงสวนแห่งชาติ (Bundesgartenschau) ที่เมืองมันน์ไฮม์ ทางตะวันตกของเยอรมนีตะวันตกในขณะนั้น เป็นโครงสร้างโดมทำจากไม้ขนาดใหญ่ที่สุด ครอบคลุมพื้นที่จัดแสดงสวนขนาด 7,400 ตารางเมตรไว้ภายใน โดยขนาดกว้างที่สุดของอาคารมีระยะพาดช่วง 80 เมตร (Axel Menges, 1995: 140-142) โครงสร้างหลังคานี้มีความแตกต่างจากการใช้โครงสร้างเคเบิลรับแรงดึงที่โอทโทเคยใช้ในงานออกแบบศาลาเยอรมันที่มอนทรีออล และโครงหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิกที่มิวนิก โดยโอทโทและทีมงานได้เลือกใช้โครงสร้างไม้ที่มีลักษณะของการใช้ไม้ซึ่งขนาดเล็กสองชั้นนำมาสานกันเป็นตารางกริด แล้วทำเป็นลักษณะโดมหรือโครงสร้างเปลือกบางที่เป็นโครงตาข่ายไม้รับแรงอัด

สำหรับการขึ้นรูปทรงของโครงการนี้ โอทโทและทีมงานได้ทดลองสร้างหุ่นจำลองโดยใช้เทคนิคของ catenary curve จากการแขวนเส้นเชือกเพื่อสร้างรูปทรงเบื้องต้นก่อน จากนั้นถ่ายภาพหุ่นจำลองเชือกแขวนนั้น แล้วทำการกลับด้านในมุม 180 องศา เพื่อให้ได้หุ่นจำลองของโครงสร้างรับแรงอัดตั้งได้กล่าวแล้วข้างต้น

สำหรับหุ่นจำลองนี้ ทีมงานได้สร้างหุ่นจำลองเชือกแขวนจากเส้นโลหะ มาตรฐาน 1:100 ทำให้ได้ตารางกริดขนาด 1.5 เซนติเมตร แล้วใช้วงแหวนโลหะขนาดเล็กเป็นจุดเชื่อมต่อเส้นโลหะเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะสามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงของระนาบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนั้น ที่วงแหวนนี้สามารถใช้แขวนก้อนน้ำหนักที่กระทำกับโครงสร้างได้ด้วย โครงสร้างทั้งหมดจะถูกแขวนไว้กับสปริง

ซึ่งเป็นอุปกรณ์ช่วยยึดโครงตาข่ายเข้ากับขอบของโครงสร้างหลัก สปริงนี้เองจะถูกใช้เพื่อช่วยในการปรับระยะและระดับให้กับโครงสร้าง เทคนิคการสร้างหุ่นจำลองแบบนี้ถูกนำไปใช้ในการสร้างรูปทรงและวิเคราะห์โครงสร้างในโครงการออกแบบอื่นอีก เช่น ศาลาญี่ปุ่น เมืองฮันโนเฟอร์ (ค.ศ. 2000) หรือโครงการสถานีรถไฟตุทการ์ท 21 (ค.ศ. 2010)



ภาพที่ 50 ทีมงานของไฟร โอทโท ร่วมกันทำหุ่นจำลองเชือกแขวน โครงการศาลาเอนกประสงค์ เมือง
มันน์ไฮม์

ที่มา: <https://www.bmiaa.com/>



© DAM UND FREI OTTO \ FOTO: UWE DETTMAR

ภาพที่ 51 รูปด้านของหุ่นจำลองศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์

ที่มา: <http://archiv.dam-online.de/handle/11153/187-011-001>



© DAM UND FREI OTTO \ FOTO: UWE DETTMAR

ภาพที่ 52 รายละเอียดของหุ่นจำลองศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์

ที่มา: <http://archiv.dam-online.de/handle/11153/187-011-001>

หลังจากได้ทำการทดสอบหุ่นจำลองโครงสร้างและวิเคราะห์แรงกระทำเรียบร้อยแล้ว ได้มีการก่อสร้างอาคารจริง ซึ่งใช้ไม้เป็นวัสดุหลักในการสร้างตารางกริด โดยใช้ไม้สองชั้นสานสลับกัน และมีการช่วยเสริมความสามารถในการรับแรงด้วยเส้นโลหะขนาดเล็กกวดไขว้กันภายในตารางกริดไม้นี้ ในการก่อสร้างมีการใช้สกรูขันโครงสร้างทั้งหมดไว้แบบหลวมๆ จากนั้นใช้รถเครนยกตัวโครงสร้างขึ้น

ไปจนถึงระดับที่ต้องการ แล้วชั้นกรวยที่จุดเชื่อมต่อระหว่างองค์อาคารให้แน่น ตัวโครงสร้างก็สามารถประกอบกันและตั้งอยู่ได้ (Ian Liddell, 2015: 39-49)



ภาพที่ 53 โครงการศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์

ที่มา: <https://www.db-bauzeitung.de/db-themen/schwerpunkt/multihalle-in-mannheim/#slider-intro-5>





ภาพที่ 54 มุมสูงของโครงการศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์

ที่มา: <https://www.detail-online.com/article/sleeping-beauty-reinventing-frei-ottos-multihalle-32256/>





ภาพที่ 55 ไพร โอทโท ขณะตรวจงานก่อสร้างศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์

ที่มา: <https://www.detail.de/>



ภาพที่ 56 รายละเอียดการประกอบกันของโครงสร้างศาลาเอนกประสงค์ เมืองมันน์ไฮม์

ที่มา: <https://www.marlowes.de/frei-ottos-multihalle-in-gefahr/>

ไฟร โอทโท ได้เคยกล่าวถึงความยากลำบากในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารหลังนี้ไว้ ซึ่งเขาได้วิศวกรอันดับต้นในขณะนั้นคือ โอฟ อาร์ป (Ove Arup) และ เท็ด ฮัพโพลด์ (Ted Huppold) เข้ามาช่วยดูแลเรื่องการวิเคราะห์และคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้าง อาคารหลังนี้แต่เดิมตั้งใจจะใช้เป็นเพียงอาคารชั่วคราวสำหรับงานจัดแสดงนิทรรศการสวนแห่งชาติเท่านั้น แต่ปรากฏว่ามันก็ยังคงไม่ถูกรื้อออกไปเมื่อจบงาน และยังตั้งอยู่จนถึงปัจจุบัน (Frei Otto, Juan Maria Songel, 2010: 43-47)

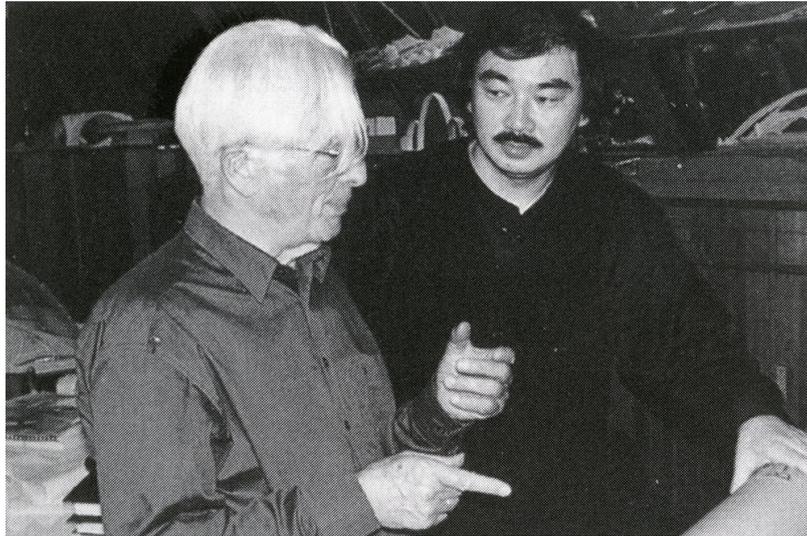
3.1.3.2 ศาลาสาลาญี่ปุ่น เมืองฮันโนเฟอร์ (Hannover) ค.ศ. 2000

ในปี ค.ศ.2000 ไฟร โอทโท ได้ร่วมกับสถาปนิกชาวญี่ปุ่นชื่อ ชิเงรุ บัน (Shigeru Ban) ในการออกแบบโครงการศาลาญี่ปุ่น เพื่อก่อสร้างในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ (World Expo) ซึ่งจัดขึ้นที่เมืองฮันโนเฟอร์ แม้จะมีพื้นฐานทางความคิดในการออกแบบเช่นเดียวกับกับโครงการที่ใช้โครงสร้าง grid shell ที่ผ่าน ๆ มา แต่ในงานออกแบบโครงการนี้บันและโอทโทได้เปลี่ยนวัสดุโครงสร้างจากไม้เป็นแกนกระดาษ (cardboard roll) ซึ่งเป็นวัสดุก่อสร้างที่บันมักเลือกใช้ในโครงการของเขา แกนกระดาษเหล่านี้เป็นวัสดุรีไซเคิลที่ถูกลำมาประกอบเป็นโถงจัดแสดงที่ครอบคลุมพื้นที่ 3,600 ตารางเมตร สูง 16 เมตร มีการใช้เทปโพลีเอสเตอร์ (polyester tape) ช่วยประสานโครงสร้างทุกช่วง 40 เมตร (Irene Meissner and Eberhard Möller, 2007: 84)



ภาพที่ 57 ระหว่างการก่อสร้างศาลาญี่ปุ่น เมืองฮันโนเฟอร์ 2000

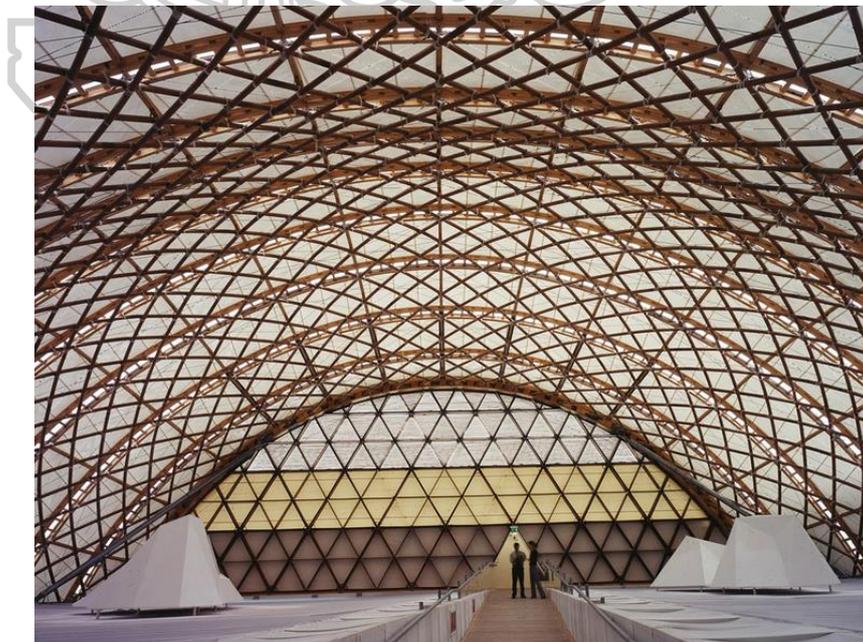
ที่มา: <https://www.detail-online.com/>



ภาพที่ 58 ไฟร โอทโท และ ชิเงรุ บัน

ที่มา: <http://www.freiottofilm.com/>

แม้ว่าตัวโครงสร้างหลักจะเป็นแกนกระดาดาชริโซเคิล แต่โอทโทเองได้แนะนำให้เพิ่มโครงสร้างส่วนที่เป็นโครงไม้ที่มีลักษณะคล้ายสะพานโค้งเพื่อใช้เป็นส่วนของโครงสร้างที่ช่วยยึดโครงแกนกระดาดาชเข้าด้วยกัน รวมถึงยังใช้เป็นโครงสร้างที่ช่วยยึดตัวแผ่นผิวหลังคาและฝ้ากระดาดาชด้วย แม้ว่าตัวบันเองจะมีความรู้สึกว่าการสร้างนี้ไม่มีความจำเป็นสำหรับศาลาของเขา แต่ก็ต้องทำเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์ความปลอดภัยตามกฎหมายอาคารในเยอรมนี



ภาพที่ 59 ภายในศาลาญี่ปุ่น เมืองฮันโนเฟอร์

ที่มา: <https://www.detail-online.com/>

3.1.3.3 สถานีรถไฟชตุทท์การ์ท 21

ไฟร โอทโท ได้ร่วมมือกับสถาปนิก คริสทอฟ อิงเงนโฮเฟน (Christoph Ingenhoven) ในการประกวดออกแบบโครงการปรับปรุงสถานีรถไฟหลักของเมืองชตุทท์การ์ท ในโครงการชื่อ Stuttgart 21 โดยโอทโทได้นำเสนอการบิดของพื้นผิวโค้งที่เกิดจากการขยายสัดส่วนคงที่อย่างต่อเนื่อง (constant curvature) (Frei Otto, Juan Maria Songel, 2010: 73-77) ในการสร้างรูปทรงของโครงสร้างเปลือกบาง ซึ่งนอกจากทำหน้าที่เป็นโครงสร้างอาคารแล้ว ยังเป็นช่องแสงเพื่อนำแสงธรรมชาติเข้ามาสู่พื้นที่สถานีที่ได้ดินด้วย

สำหรับการทำหุ่นจำลองเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างนั้น โอทโทยังใช้เทคนิคเดิมที่เคยใช้ในการออกแบบโครงการศาลาเอนกประสงค์เมืองมันน์ไฮม์ คือ การสร้างหุ่นจำลองด้วยเทคนิคการแขวนเชือกเป็นโครงตาข่าย แล้วทำการแขวนน้ำหนักที่จุดเชื่อมต่อ (Node) ของเส้นโครงสร้าง จากนั้นทำการวิเคราะห์และคำนวณโครงสร้างในกรณีทีกลับด้านรูปถ่ายโครงเชือกแขวนนี้ในมุม 180 องศา เพื่อให้พฤติกรรมของการรับแรงในโครงสร้างเปลี่ยนจากการรับแรงดึงเป็นโครงสร้างรับแรงอัด



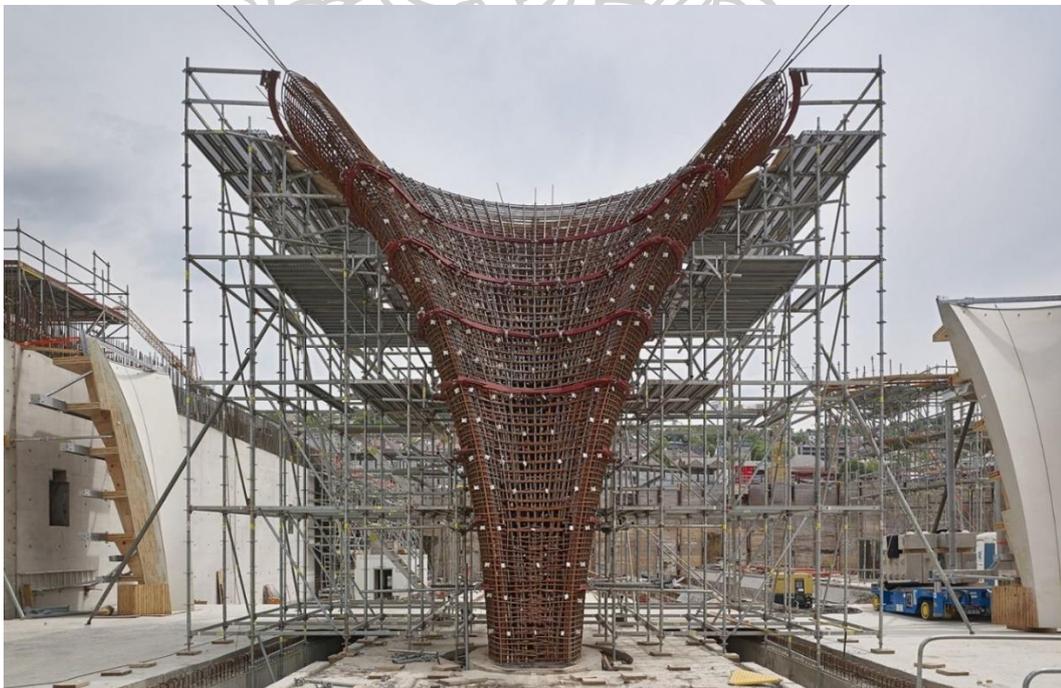
ภาพที่ 60 หุ่นจำลองเชือกแขวนในการออกแบบโครงการ Stuttgart 21

ที่มา: <http://eat-a-bug.blogspot.com/>



ภาพที่ 61 มุมสูงของโครงสร้างสถานี Stuttgart 21

ที่มา: <https://www.structure-magazin.de/artikel/die-kelchstuetzen-von-stuttgart21-33768/>



ภาพที่ 62 โครงสร้างหลักของโครงการ Stuttgart 21

ที่มา: <https://www.structure-magazin.de/artikel/die-kelchstuetzen-von-stuttgart21-33768/>

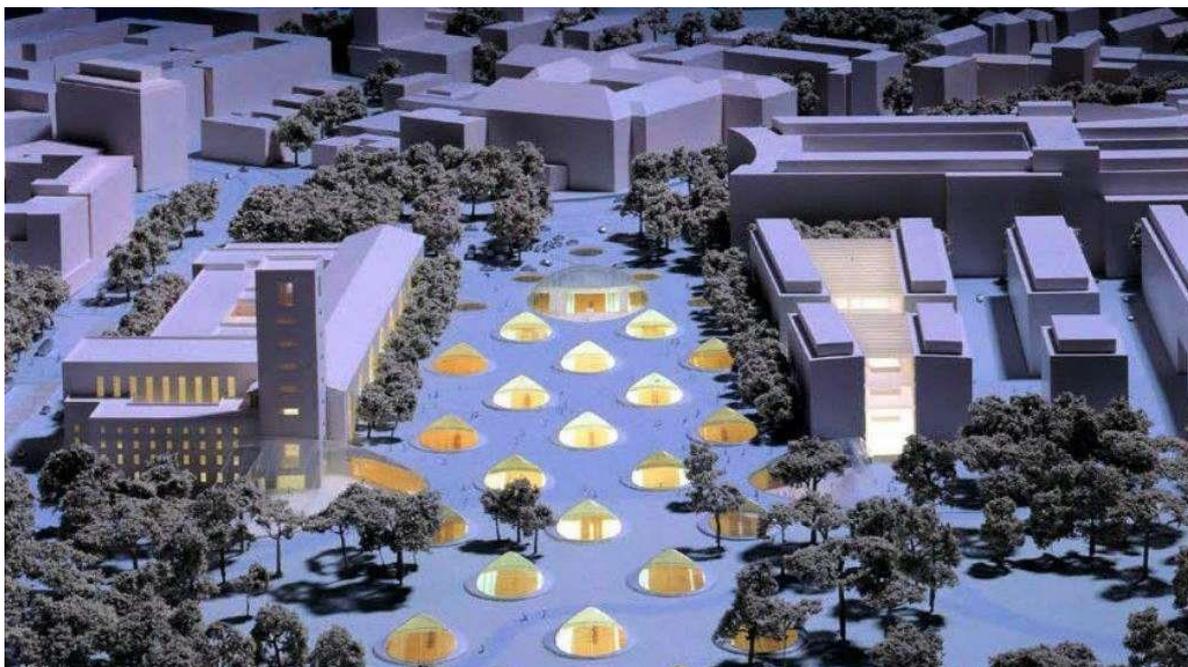


ภาพที่ 63 ทศนียภาพภายในสถานี Stuttgart 21

ที่มา: [https://www.spiegel.de/consent-a-](https://www.spiegel.de/consent-a-?targetUrl=https%3A%2F%2Fwww.spiegel.de%2Finternational%2Fbusiness%2Fberlin-alarmed-at-cost-overruns-of-stuttgart-21-station-project-a-880112.html&ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F)

[?targetUrl=https%3A%2F%2Fwww.spiegel.de%2Finternational%2Fbusiness%2Fberlin-alarmed-at-cost-overruns-of-stuttgart-21-station-project-a-880112.html&ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://www.spiegel.de/consent-a-?targetUrl=https%3A%2F%2Fwww.spiegel.de%2Finternational%2Fbusiness%2Fberlin-alarmed-at-cost-overruns-of-stuttgart-21-station-project-a-880112.html&ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F)

โครงการปรับปรุงสถานีรถไฟชตุทการ์ทนี้กินระยะเวลายาวนานมาก นับตั้งแต่ประกวดออกแบบตั้งแต่ปี ค.ศ.1994 และเริ่มดำเนินการก่อสร้างเมื่อปี ค.ศ.2010 แต่ด้วยงบประมาณที่บานปลายมาก ทำให้การก่อสร้างนั้นเป็นไปได้อย่างล่าช้า ไพร โอทโท เองเสียชีวิตเมื่อวันที่ 9 มีนาคม ค.ศ. 2015 ในช่วงเวลาที่เขาได้รับการประกาศให้เป็นสถาปนิกที่ได้รับรางวัล Pritzker prize ในปีนั้น ในขณะที่โครงการก่อสร้าง Stuttgart 21 ยังคงดำเนินการไม่แล้วเสร็จ จนถึงปัจจุบันนี้ โครงการออกแบบชิ้นนี้จึงนับเป็นผลงานชิ้นสุดท้ายในชีวิตของ ไพร โอทโท



ภาพที่ 64 ทุนจำลองแสดงโครงการ Stuttgart 21

ที่มา: <https://www.fr.de/politik/hart-limit-11410823.html>

3.2 การทำงานในฐานะนักวิจัย

ไฟร โอทโท นั้นมีบทบาทด้านที่เป็นนักวิชาการสูงมาก เขามีความสนใจที่จะพัฒนาการออกแบบด้วยหลักการทางวิทยาศาสตร์ ผ่านกระบวนการทดลองมากมาย ซึ่งสังเกตได้จากการทดลองเพื่อสร้างรูปทรงและการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการก่อสร้างโครงสร้างเบาชนิดต่าง ๆ ซึ่งเขาได้ใช้เป็นพื้นฐานมาตั้งแต่การทำวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกเมื่อปี ค.ศ.1954 แล้ว

หลังจากจบการศึกษา ไฟร โอทโท ได้เปิดสำนักงานออกแบบของตัวเองขึ้นที่เมืองเบอร์ลิน เมื่อปี ค.ศ. 1958 พร้อมกับได้ก่อตั้งสถาบันพัฒนาการก่อสร้างโครงสร้างเบา (Entwicklungsstätte für den Leichtbau, EL) ขึ้นภายในสำนักงานของเขาด้วย ต่อมาในปี ค.ศ. 1961 โอทโทได้ร่วมกับนักชีววิทยาชื่อ โยฮันน์ แกร์ฮาร์ด เฮลมัคเค (Johann Gerhard Helmcke) สร้างหน่วยงานวิจัยในชื่อกลุ่มชีววิทยาการก่อสร้าง (Biologie und Bauen) ที่เบอร์ลิน ต่อมาในปี ค.ศ.1964 โอทโทได้เข้ารับตำแหน่งศาสตราจารย์ที่มหาวิทยาลัยชตุทการ์ท และได้ก่อตั้งสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา (Institut für Leichte Flächentragwerke, IL) ขึ้น เพื่อศึกษาวิจัยการออกแบบโครงสร้างเบาชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะ โดยเขาได้เป็นผู้อำนวยการสถาบันจนถึงปี ค.ศ.1991 ซึ่งตั้งแต่ปี ค.ศ. 1984 ถึงปี ค.ศ.1991 ไฟร โอทโท ได้รับทุนโครงการวิจัยระยะยาวในประเด็นการก่อสร้างแบบธรรมชาติ (Natürlich Bauen) ภายใต้ชื่อโครงการ SFB230 (Sonderforschungsbereich 230) งานศึกษา

วิจัย และทดลองต่าง ๆ ตลอดระยะเวลายาวนานนี้ เป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยให้เข้าใจความคิดและวิธีการในการออกแบบของไฟร โอทโท ในอีกด้านหนึ่ง นอกเหนือจากงานออกแบบโครงการต่าง ๆ

3.2.1 สถาบันพัฒนาการก่อสร้างโครงสร้างเบา (Entwicklungsstätte für den Leichtbau, EL)

ไฟร โอทโท ได้ก่อตั้งสำนักงานและสถาบันวิจัยส่วนตัวขึ้นเมื่อปี 1957 ที่เบอร์ลิน ซึ่งต่อมาได้ย้ายไปตั้งที่วาร์บรอนน์ (Warmbronn) ใกล้เมืองชตุทการ์ท ใช้ชื่อสำนักงาน Atelier Frei Otto Warmbronn ซึ่งเป็นสำนักงานออกแบบที่ไฟร โอทโททำงานร่วมกับลูกศิษย์คนสำคัญ เช่น ร็อบ ไครเออร์ (Rob Krier) โบโด ราช (Bodo Rasch) และลูกสาว คริสทีน โอทโท-คานสติงเงอร์ (Christine Otto-Kanstinger) หลังจากเสียชีวิตเมื่อปี ค.ศ.2015 คริสทีน ยังคงทำงานออกแบบโครงสร้างเบาต่อเนื่องจากพ่อ

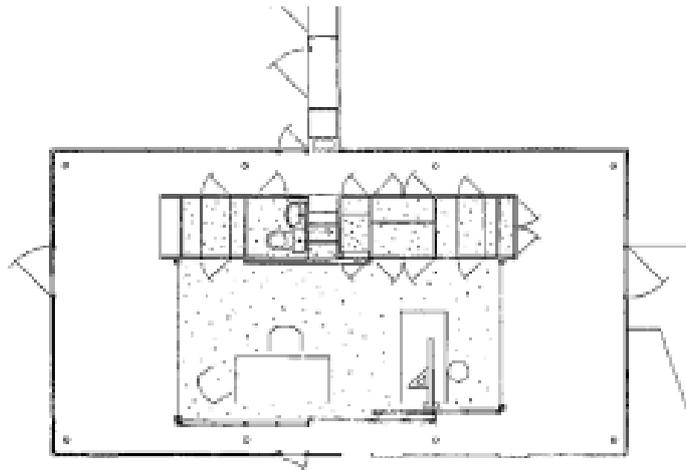


ภาพที่ 65 สำนักงานออกแบบและสถาบันวิจัยของไฟร โอทโท ที่เบอร์ลิน

ที่มา: <https://www.archplus.net/home/news/7,1-13192,1,0.html>

สำหรับช่วงแรกของการทำงานและศึกษาวิจัยที่นั่นนั้น ไฟร โอทโทได้ร่วมมือกับเพเธอร์ ชโตรเมเยอร์ ซึ่งเป็นผู้ที่ตอบรับจดหมายขอเข้าไปพบเพื่อสัมภาษณ์และเสนอความคิดในการออกแบบโครงสร้างเต็นท์ของไฟร โอทโท ในขณะที่กำลังศึกษาปริญญาเอกอยู่ ในช่วงนี้ไฟร โอทโทได้ทำหน้าที่เป็นผู้ออกแบบหลักให้กับชโตรเมเยอร์ ไฟร โอทโททดลองและเริ่มออกแบบโครงสร้างเต็นท์ในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งมีชโตรเมเยอร์เป็นผู้ก่อสร้าง จากจุดเริ่มต้นด้วยโครงสร้างเต็นท์เล็ก ๆ รูปร่างแปลกตาในงานจัด

แสดงสวน สู่การพัฒนาเป็นการออกแบบโครงสร้างระบบโครงตาข่ายเคเบิลที่งานโครงการศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีออล เมื่อปี ค.ศ.1967 โครงการหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิก ที่มิวนิก ค.ศ. 1972 และโครงการอื่น ๆ ซึ่งชโตรเมเยอร์ก็เป็นผู้ก่อสร้างหลักสำหรับโครงการเหล่านั้น กล่าวได้ว่าในระยะแรกนี้ ไฟร โอทโท ได้ผู้ประกอบการภาคอุตสาหกรรมที่เป็นผู้เชี่ยวชาญเรื่องการก่อสร้างโครงสร้างเต็นท์เป็นผู้สนับสนุนให้เกิดการทดลองและออกแบบโครงสร้างเบาที่เป็นผ้าใบในรูปแบบต่าง ๆ จนมีชื่อเสียงเป็นที่รู้จักจากโครงการขนาดเล็กสู่โครงการขนาดใหญ่มาก ๆ



ภาพที่ 66 ผังพื้นและพื้นที่ทำงานภายในสำนักงาน

ที่มา: <https://www.archplus.net/home/news/7,1-13192,1,0.html>

นอกจากการศึกษาวิจัยแล้ว สำหรับอาคารสำนักงานและสถาบันวิจัยนี้ ไฟร โอทโท ออกแบบโดยคำนึงถึงความประหยัด ประโยชน์ใช้สอย และความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศที่เป็นเมืองหนาว มีหิมะตกในช่วงฤดูหนาว ตัวอาคารใช้โครงสร้างเหล็กอย่างง่าย เปิดพื้นที่โล่งภายในโดยไม่

มีเสาโครงสร้างวางพื้นที่ใช้สอย มีพื้นที่ใช้งานหลักอยู่บริเวณตรงกลางของผังพื้นที่ โดยเว้นระยะทางเดินโดยรอบที่มีขนาดกว้าง เมื่อถึงฤดูหนาวพื้นที่ภายในยังคงอบอุ่น หรือในฤดูร้อนพื้นที่ส่วนทางเดินนี้จะถูกปรับใช้เป็นที่ทำงานได้ โดยพื้นที่ทำงานหลักในส่วนกลางจะมีชายคายื่นยาวเพื่อบังแดด สำหรับผิวผนังอาคารเป็นกระจกเพื่อให้แสงและความร้อนผ่านเข้าไปยังพื้นที่ใช้งานภายในได้สะดวก มีการใช้ม่านเพื่อช่วยกรองแสงและเปิดปิดเพื่อการปิดกั้นพื้นที่ระหว่างภายในและภายนอกได้แนวคิดในการออกแบบอาคารนี้ถูกนำไปพัฒนาใช้ต่อไปในการสร้างสำนักงานแห่งใหม่ที่วาร์มบรอนน์ด้วย



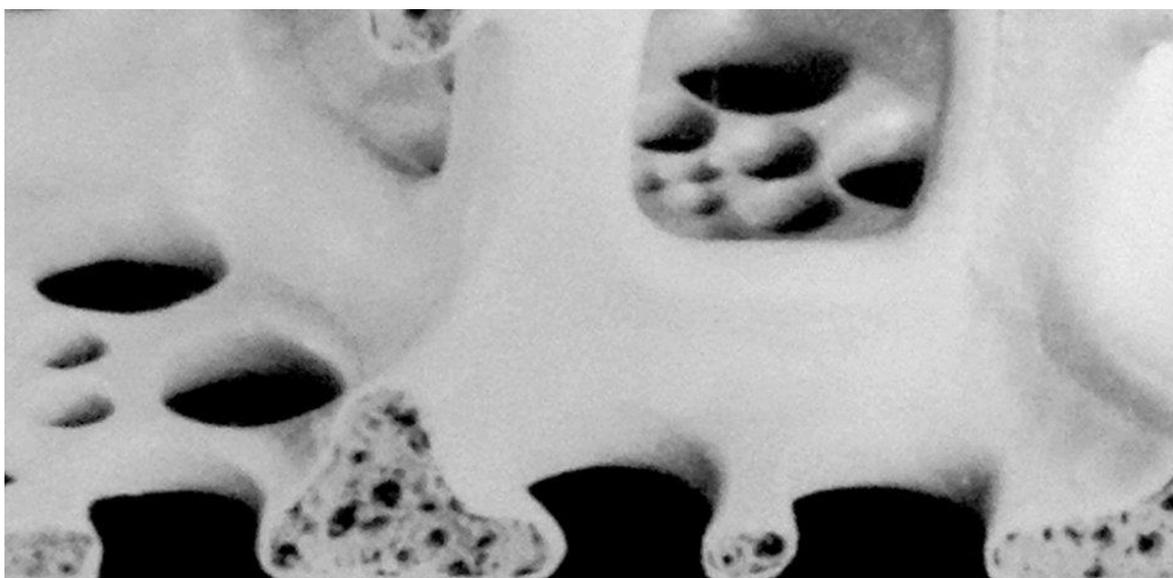
ภาพที่ 67 Atelier Frei Otto Warmbronn

ที่มา: <https://www.archilovers.com/projects/151390/otto-residence.html>

3.2.2 หน่วยวิจัยชีวะการก่อสร้าง (Biologie und Bauen)

ระหว่างปี ค.ศ.1961-1962 ระหว่างที่ยังพำนักอยู่ที่เบอร์ลิน ไพร โอทโท ได้ร่วมกับนักชีววิทยา โยฮันน์ แกร์ฮาร์ด เฮลเมคเค ก่อตั้งกลุ่มวิจัยชีวะการก่อสร้างขึ้น โดยได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคนิคเบอร์ลิน กลุ่มวิจัยนี้เป็นการรวมเอานักวิทยาศาสตร์ แพทย์ นักออกแบบ และวิศวกรเข้ามารวมกันเพื่อระดมสมองและหาความเป็นไปได้ในการประสานความรู้จากหลายสาขาเข้าด้วยกัน ในการสร้างสรรค์โครงสร้างแบบใหม่ ซึ่งในที่สุดแล้ว ไพร โอทโท ได้ศึกษาไปถึงต้นกำเนิดของสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย และพบว่า เซลล์ต้นกำเนิดของสิ่งมีชีวิตนั้นมีลักษณะเป็นเซลล์รูปร่างกลมขนาดเล็ก มีผิวที่แข็งแรงทอหุ้มของเหลวไว้ภายใน ซึ่งโอทโทเรียกกรุปทรงต้นกำเนิดนี้ว่า pneu

เหล่านักวิชาการจากศาสตร์ต่าง ๆ ที่มารวมกลุ่มกันเพื่อวิจัยในโครงการนี้ต่างเห็นพ้องกันว่า การก่อสร้างอาคารโดยมนุษย์นั้นได้ทำลายสมดุลในระบบนิเวศไปมาก ในขณะที่ธรรมชาติเองพยายามที่จะปรับตัวเองเพื่อความอยู่รอด ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหานี้ นักออกแบบและวิศวกรจำเป็นจะต้องสถาปนาวิธีการออกแบบและก่อสร้างแบบธรรมชาติ เพื่อรักษาไว้ซึ่งสมดุลแห่งการอยู่ร่วมกันของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกนี้ ซึ่งไฟร โอทโท เห็นว่า สถาปนิกนั้นควรต้องพึ่งพาความรู้จากนักชีววิทยา เนื่องจากชีวิตคือปฐมของการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตในโลก ส่วนความรู้เรื่องเทคโนโลยีต่าง ๆ นั้นเป็นเรื่องรอง (Frei Otto, 1982: 8-9)



ภาพที่ 68 ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ โดย เฮลเมคเคและทีมงาน
ที่มา: Verlag Bild und Forschung 1962, Berlin (<https://www.smb.museum/>)

จากการศึกษานี้เองทำให้โอทโทขยายความรู้เรื่องการออกแบบโครงสร้างประเภทอัดอากาศจากงานที่เคยได้ตีพิมพ์หนังสือเรื่องโครงสร้างรับแรงดึง ฉบับที่ 1 ว่าด้วยโครงสร้างอัดอากาศ (Pneumatic structure) โดยมีชื่อหนังสือในภาษาเยอรมันว่า Zugbeanspruchte Konstruktionen. Bd. 1. Pneumatische Konstruktionen ในปี ค.ศ.1962

หนังสือเล่มนี้เป็นผลสรุปการศึกษา โดยได้แรงบันดาลใจเบื้องต้นจากกลุ่มวิจัยชีวะการก่อสร้างดังกล่าวแล้ว โอทโทได้ผสมผสานความรู้เชิงเทคนิคก่อสร้างเพื่อให้ได้เป็นคู่มือในการออกแบบและก่อสร้างชนิดนี้ โดยได้วิศวกร รูดอล์ฟ ไทรสเทล (Rudolf Trostel) เข้ามาช่วยในการนำเสนอการวิเคราะห์และการคำนวณโครงสร้างซึ่งจะมีแรงกระทำที่ผิวโค้งของโครงสร้าง การวิเคราะห์และคำนวณโครงสร้างซึ่งมีความซับซ้อนและยากลำบากในขณะนั้นต้องใช้ความสามารถของบุคคลอยู่ เนื่องจากเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ยังไม่พัฒนาจนสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก ๆ ได้ หนังสือเล่มนี้จึงเปรียบเสมือนคู่มือในการออกแบบสถาปัตยกรรม วิศวกรรม

โครงสร้าง และวิธีการก่อสร้างที่มีความสมบูรณ์มากในช่วงเวลานั้น และได้ช่วยส่งเสริมให้ภาพลักษณ์ของ ไฟร โอทโท คือนักออกแบบโครงสร้างเบาในวงกว้างอีกด้วย



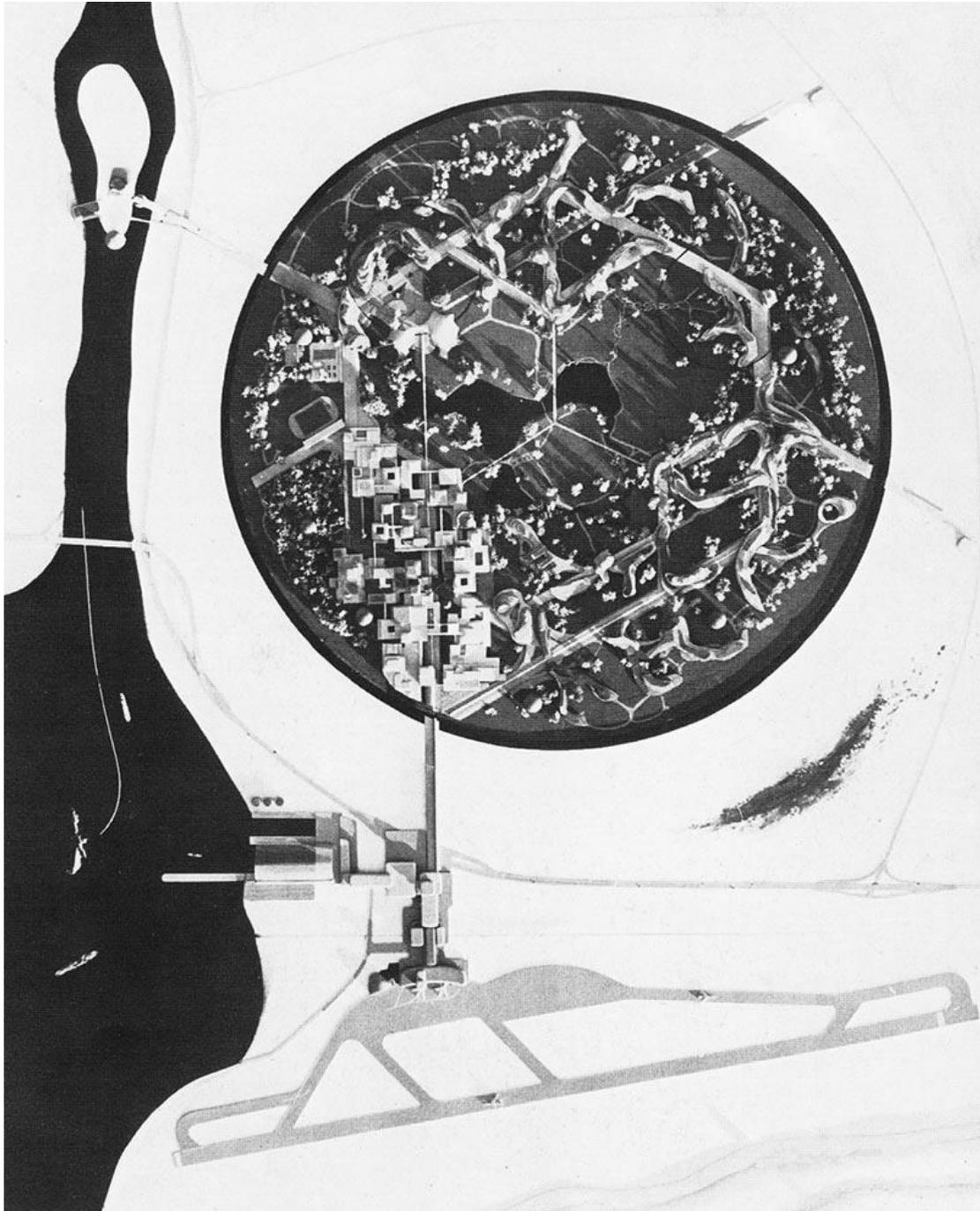
ภาพที่ 69 รูปแบบของโครงสร้างอัดอากาศ

ที่มา: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/>

ในปี ค.ศ. 1964 เมื่อ ไฟร โอทโท ได้รับตำแหน่งศาสตราจารย์ที่มหาวิทยาลัยซตุทการ์ท และก่อตั้งสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา (Institut für Leichte Flächentragwerke, IL) ที่นั่น แนวทางการวิจัยที่เป็นกลุ่มสหวิทยาการนี้ก็ยังคงดำเนินการต่อไป

ไฟร โอทโท เชื่อว่า โครงสร้างอัดอากาศ เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เพราะมีมวลน้ำหนักของวัสดุที่น้อยที่สุด (Frei Otto, 2011: 70) ตัวอย่างงานออกแบบโครงสร้างอัดอากาศหนึ่งที่น่าสนใจคือ Arctic City โดยในปี ค.ศ. 1971 ไฟร โอทโท ร่วมกับ เอวาลด์ บูบเนอร์ (Ewald bubner) เคนโซะ ทังเงะ (Kenzo Tange) และบริษัทวิศวกรอาร์ป (Arup) ในการออกแบบแนวความคิดโครงการสร้างเมืองในอนาคตกกลางทะเลอาร์คติก ชื่อโครงการ Arctic city สำหรับผู้อยู่อาศัย 40,000 คน เป็นเมืองอนาคตที่มีการออกแบบและวางผังอย่างท้าทายด้วยระบอบการสัญจรที่ซ้อนกันหลายชั้น มีการผลิตพลังงานสำหรับเมืองด้วยระบบไฟฟ้านิวเคลียร์ มีท่าเรือ สนามบิน และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ อย่างครบครัน เมืองนี้ตั้งอยู่ภายใต้โดมที่ใช้ระบบโครงสร้างอัดอากาศ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 กิโลเมตร โครงสร้างอโดอากาศนี้มีส่วนช่วยในการปรับและรักษาอุณหภูมิ และความชื้นภายในเมืองให้มีความเหมาะสมแก่การอยู่อาศัย



ภาพที่ 70 ผังเมือง Arctic city

ที่มา: <https://hiddenarchitecture.net/city-in-arctic/>



ภาพที่ 71 ไฟร โอทโท กับหุ่นจำลอง Arctic city

ที่มา: <https://hiddenarchitecture.net/city-in-arctic/>

3.2.3 สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา (Institut für Leichte Flächentragwerke, IL) สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของ ไฟร โอทโท นั้น เป็นสถาบันที่ทรงอิทธิพลมากต่อการศึกษ วิจัย ทดลอง และพัฒนาแนวความคิดในการออกแบบโครงสร้างพิเศษต่าง ๆ ด้วยแนวทางการทำงานที่บูรณาการศาสตร์ความรู้จากหลากหลายสาขาเข้ามาวิจัยร่วมกัน ทำให้สามารถผลิตผลงานที่เป็นความรู้ไว้มากมาย ตลอดระยะเวลากว่า 30 ปี โอทโทและทีมงานได้ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานมากมาย โดยเฉพาะที่เป็นที่รู้จักทั่วโลกคือรายงานวิจัยในชุด IL ซึ่งนำเสนอผลงานศึกษา การทดลองต่าง ๆ ในสถาบันของเขาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปี ค.ศ. 1991 ที่โอทโทเกษียณจากมหาวิทยาลัย ได้ตีพิมพ์รายงานวิจัยในชุดนี้ไปทั้งสิ้น 41 เล่ม ไม่รวมผลงานอื่น ๆ และปัจจุบันนี้ สถาบันยังคงตีพิมพ์ผลงานของโอทโทและทีมงานซ้ำออกมาอยู่เสมอ สำหรับให้ผู้สนใจศึกษาได้เข้าถึงข้อมูลสำคัญชุดนี้



ภาพที่ 72 เอกสารรายงานวิจัยในชุด IL ของไฟร โอทโทและทีมงานที่สถาบันการออกแบบโครงสร้าง
เบา

ที่มา: <https://www.leichtbauverein.de/publikationen/il-mitteilungen/index.htm>

สำหรับเนื้อหาต่าง ๆ ที่ปรากฏในชุดวิจัย IL นั้นมีความหลากหลายและกว้างขวางมาก เป็น
การพยายามศึกษาและหาความเป็นไปได้ในการออกแบบตบโครงสร้างเบาจากหลายมุมมองและวิธีการ
อาจกล่าวสรุปโดยสังเขปดังนี้

IL 1: Minimal Nets, 1969

นำเสนอการทดลองสร้างการเชื่อมต่อจุดอิสระบนระนาบหรือที่ว่าง ด้วยการใช้ฟิล์มสปู ซึ่ง
จะทำให้เกิดระยะขจัดในการเชื่อมต่อจุดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

IL 2: City in the Arctic, 1971

เป็นการศึกษาและออกแบบเมืองในอนาคตกลางทะเล ครอบคลุมพื้นที่ขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 2 กิโลเมตร ใช้โครงสร้างอัดอากาศที่ทำจากวัสดุโปร่งแสงเพื่อสร้างระบบนิเวศภายในพื้นที่
เมือง

IL 3: Biology and Building 1, 1971

เป็นเอกสารรวบรวมบทความจากการประชุมวิชาการในหัวข้อ ปัจเจกและการดำรงอยู่ในสภาพแวดล้อม สถานการณ์ที่น่าเป็นห่วงสำหรับการเติบโตของเมือง ที่อยู่อาศัยของสัตว์ การวางผังเมือง และความรู้ทางด้านชีววิทยา

IL 4: Biology and Building 2, 1971

รวบรวมการศึกษาทดลองที่น่าสนใจของสถาบันในขณะนั้น เช่น พัฒนาการจากโครงสร้างห่อหุ้มของเหลวสู่โครงสร้างกระดูกและกล้ามเนื้อ โครงสร้างแบบแซนด์วิชในโครงกะโหลกนก หลักการของโครงสร้างเบาในสิ่งมีชีวิต เสถียรภาพสูงสุด เป็นต้น

IL 5: Convertible Roofs, 1972

งานวิจัยเกี่ยวกับพัฒนาการของการออกแบบโครงสร้างหลังคา มุ่งประเด็นเรื่องหลังคาที่สามารถพับได้ มีการศึกษาเรื่องรูปทรงและการก่อสร้าง การแปรเปลี่ยนของรูปทรงในเชิงเรขาคณิต เมื่อโครงสร้างมีการขยับ และการเปิดประเด็นเรื่องการพัฒนาการออกแบบโครงสร้างหลังคาพับได้

Research about the

IL 6: Biology and Building 3, 1973

การศึกษาเรื่องใยแมงมุม โครงสร้างของกระดูกมนุษย์และแบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพทั่วไปของสิ่งมีชีวิต โดยอาศัยการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายจากมุมต่าง ๆ แบบสามมิติ

IL 7: Shadow in the Desert, 1974

การศึกษาและออกแบบโครงหลังคาด้วยระบบตาข่ายสำหรับพื้นที่เขตร้อน นำเสนอประเด็นเรื่องการควบคุมสภาวะแวดล้อมใต้พื้นหลังคาสำหรับการใช้งาน การออกแบบโครงสร้าง การจัดหาและขนส่งวัสดุ และการควบคุมราคาค่าก่อสร้าง

IL 8: Nets in Nature and Technics, 1975

นำเสนอภาพรวมกว้าง ๆ ของการจัดประเภทของโครงสร้างระบบตาข่ายในเชิงเทคนิค และมีประเด็นเสริมอื่น ๆ เช่น ไฟเบอร์กับเคเบิล ระบบการก่อสร้างของโครงสร้างแบบตาข่าย การเชื่อมต่อเคเบิล การก่อสร้างโครงสร้างแบบตาข่าย และรูปแบบของโครงสร้างตาข่ายในใยแมงมุมและแมลงอื่น ๆ

IL 9: Pneus in Nature and Technics, 1977

รายงานวิจัยของกลุ่มสหวิทยาการระหว่างที่วิจัยของสถาบันการออกแบบอาคารสร้างเบา และนักชีววิทยาเพื่อนำเสนอหลักการซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างที่ห่อหุ้มเซลล์ลักษณะทรงกลม (pneus) มีการนำเสนอตัวอย่างและการพัฒนาโครงสร้างในเชิงเทคนิค สรุปผลการศึกษานำเรื่องระบบโครงสร้างแบบ pneus ว่าเป็นโครงสร้างของรูปทรงเบื้องต้นของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ

IL 10: Grid Shells, 1974

พื้นฐานและวิธีการสร้างรูปทรงของโครงสร้างตารางกริดเปลือกบาง (grid shell) การทำ
 ทุนจำลองเชือกแขวน การเปลี่ยนทุนจำลองเชือกแขวนเป็นทุนจำลองของโครงสร้างรับแรงอัด ความ
 เป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการออกแบบ

IL 11: Lightweight and Energy Technics, 1978

โครงการพัฒนาและออกแบบหอน้ำเย็น (cooling tower) ในรูปแบบต่าง ๆ โครงสร้าง
 วิศวกรรมน้ำ การเก็บน้ำแบบต่าง ๆ เมมเบรนสำหรับงานระบบกำจัดน้ำเสีย และประเด็นย่อยเรื่อง
 ระบบพลังงานจากแสงอาทิตย์ ลม และน้ำ รวมถึงการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

IL 12: Convertible Pneus, 1975

แนวความคิดในการออกแบบและตัวอย่างของการออกแบบโครงสร้างอัดอากาศที่สามารถ
 เคลื่อนไหวได้ ภายในเล่มมีการรวบรวมภาพของ pneu แบบต่าง ๆ และการศึกษาโครงสร้างผนังเซลล์
 ของ pneu ในระดับอะตอม ซึ่งทำให้เรามองเห็นภาพของโครงสร้าง ตอนท้ายมีการนำเสนอผลงาน
 การออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างผ้าใบในกลุ่มประเทศยุโรป

IL 13: Multihalle Mannheim, 1978

เป็นการสรุปผลงานการออกแบบศาลาเอนกประสงค์ (Multihalle) ขนาดพื้นที่ใช้สอย
 80,000 ตารางฟุตสำหรับงานจัดแสดงสวนแห่งชาติที่เมืองมันน์ไฮม์ (Mannheim) ในเล่มอธิบาย
 กระบวนการทุกขั้นตอนอย่างละเอียด ตั้งแต่การทำแบบที่ใช้ในการประกวดจนกระทั่งก่อสร้างอาคาร
 แล้วเสร็จ

IL 14: Adaptable Architecture, 1975

สรุปเอกสารรวบรวมบทความจากการประชุมวิชาการในประเด็นประวัติศาสตร์ของ
 โครงสร้างแบบขยับตัวได้ ชีววิทยา การแพทย์ สถาปัตยกรรม และการวางผังเมือง รวมถึงหลักการ
 ของการออกแบบโครงสร้างที่สามารถขยับปรับตัวได้

IL 15: Lufthallenhandbuch, 1983

เป็นเอกสารเกี่ยวกับการออกแบบสถาปัตยกรรมและโครงสร้างอัดอากาศ การวิเคราะห์
 และคำนวณโครงสร้าง การตัดแผ่นวัสดุแลทาร์รอยต่อ ๖ กระบวนการผลิตแผ่นวัสดุ ในตอนท้ายมี
 รายละเอียดของวัสดุชนิดต่าง ๆ และข้อกำหนดสำหรับการออกแบบในเชิงวิศวกรรม

IL 16: Tents, 1976

เป็นภาคเสริมของการออกแบบโครงสร้างผ้าใบในเชิงปฏิบัติ การก่อสร้างโครงสร้างผ้าใบ
 ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ หนังสือเล่มนี้เน้นการนำเสนอผลงานที่ออกแบบร่วมกับ เพเธอร์ ชโตร
 เมเยอร์ (Peter Stromeyer) ซึ่งไฟร โอทโทร่วมงานด้วยมาเป็นระยะเวลายาวนาน

IL 17: The work of Frei Otto and his Teams, 1978

หนังสือแคตตาล็อกรวบรวมผลงานของสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา ซึ่งจัดแสดงในนิทรรศการ ณ พิพิธภัณฑ์ศิลปะสมัยใหม่ นิวยอร์ก (Museum of Modern Art, New York) นิทรรศการนี้ถูกจัดแสดงหมุนเวียนไปยังที่ต่าง ๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกาและแคนาดาด้วย และในปี ค.ศ. 1974 โครงสร้างของการจัดแสดงงานถูกบริจาคให้กับมหาวิทยาลัยอิลลินอยส์ (University of Illinois) เพื่อปรับใช้เป็นส่วนหนึ่งของสิ่งอำนวยความสะดวกกลางแจ้ง

IL 18: Forming Bubbles, 1988

นำเสนอการทดลองกับฟิล์มสบู่ในเชิงวิทยาศาสตร์ สถาปัตยกรรม และเทคนิค การวิจัยเรื่องฟิล์มสบู่เหล่านี้เป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาเรื่องระยะขจัด (minimal ways) ระนาบหรือพื้นผิวขจัด (minimal surfaces) และการสร้างหุ่นจำลอง (form finding) สำหรับการออกแบบโครงสร้างผ้าใบ โครงตาข่าย และ โครงสร้างอัดอากาศ

IL 19: Growing and Dividing Pneus, 1979

ศึกษากระบวนการในการก่อรูปและการขยายตัวของโครงสร้างเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (pneu) ในธรรมชาติ และการประยุกต์ใช้ในเชิงเทคนิค

IL 20: Tasks, 1979

ปัญหาและคำถามสำคัญสำหรับการพัฒนาการออกแบบโครงสร้างเบา ทั้งในเชิงการศึกษาวิจัยและการนำไปใช้งานจริง

IL 21: Form Force Mass 1 – Basics, 1979

ความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรง มวล และประสิทธิภาพของโครงสร้างของรูปทรงในธรรมชาติ และการประยุกต์ใช้ในเชิงเทคนิค ตอนท้ายมีเนื้อหาส่วนหนึ่งกล่าวถึงสุนทรียะในงานโครงสร้างเบา

IL 22: Form Force Mass 2 – Form, 1988

ข้อเสนอแนะสำหรับการจัดระบบของโครงสร้าง และคำอธิบายรูปทรงลักษณะต่าง ๆ ประกอบกับภาพถ่าย

IL 23: Form Force Mass 3 – Structure, 1992

การจำแนกประเภทและลักษณะของโครงสร้าง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างสรรค์รูปทรงในเชิงเทคนิค

IL 24: Form Force Mass 4 – The Lightweight Principle, 1998

ค่าใช้จ่ายและการปรับองค์ประกอบโครงสร้างให้เหมาะสมกับโครงสร้าง: ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับวิธี Bis-Lambda-Method

IL 25: Form Force Mass 5 – Experiments, 1990

การทดลองเกี่ยวกับการพึ่งพาของรูปแบบแรงและมวล กระบวนการก่อรูปด้วยตัวเองในเชิงชีววิทยาและการก่อสร้าง การขึ้นรูปและวิธีการสร้างแบบจำลอง งานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ปริญญาเอกของชุกฟรีด กาส (Siegfried Gäß)

IL 26: Nature and Architecture, 1980

เอกสารการแข่งขันประกวดแบบสำหรับเยาวชนต่างประเทศโดยความร่วมมือกับสถาบันความร่วมมือระหว่างประเทศ (Institut für Auslandsbeziehungen) xit0eg,nv'ชุดตุ๊กตาคารท์ หนังสือเล่มนี้มีรูปภาพของเด็ก 810 คนจาก 24 ประเทศพร้อมความเห็นจากสถาปนิกนักนิเวศวิทยาและศิลปิน

IL 27: Natural Building, 1981

ผลงานในการสัมมนาเรื่อง Natural Building ซึ่งจัดขึ้นในฤดูใบไม้ร่วงปี ค.ศ. 1979 ที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา ในหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ ธรรมชาติและสังคม อาคารที่ก่อรูปด้วยตนเอง โครงสร้างธรรมชาติและอาคารอินทรีย์ และระบบนิเวศ

IL 28: Diatoms 1 - Shells in nature and technics, 1985

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและการสังเคราะห์คุณลักษณะของไดอะตอมโดยนักชีววิทยา ฌอลเมคเค (J.-G. Helmcke) พื้นฐานทางทฤษฎีและการทดลองกระบวนการกำเนิดรูปทรง

IL 29: The Tent Cities of the Hajj, 1980

หนังสือเล่มนี้เล่าเรื่องต้นกำเนิดของฮัจญ์ ผู้แสวงบุญสู่เมคคาห์ ชั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อปัญหาการวางแผนระดับเมือง เนื้อหาในหนังสือมีการตั้งข้อสังเกตและตีความเรื่องการใช้โครงสร้างผ้าใบ เมืองที่ประกอบขึ้นจากโครงสร้างผ้าใบและการจัดการในระดับเมือง

IL 30: Sun & Shade (Vela, Toldos, Schattenzelte), 1984

การศึกษาและการพิจารณาในอาคารตรงอาบน้ำโรมัน (Roman Theatre Vela) โครงสร้างผ้าใบ (Toldos) ของเซวิลลา (Sevilla) เต็นท์แผ่นโลหะของซิงเคิล (Schinkel) และอาคารที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ

IL 31: Bamboo, 1985

นำเสนอเรื่องการใช้ไม้ไผ่สำหรับการก่อสร้างอาคาร ไม้ไผ่เป็นวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (วิทยานิพนธ์ของ Klaus Dunkelberg) การก่อสร้างอาคารด้วยไม้ในรูปทรงแบบใหม่ โครงสร้างและรายละเอียดการก่อสร้าง

IL 32: Lightweight in Architecture and Nature, 1983

แคตตาล็อกสำหรับงานนิทรรศการ "โครงสร้างธรรมชาติ" (Natural Structure) ที่พิพิธภัณฑ์สถาปัตยกรรมชัสเซฟ (Shushev Museum of Architecture) ในมอสโก เมื่อปี ค.ศ. 1983

ซึ่งเป็นนิทรรศการนำเสนองานวิจัยและโครงการของกลุ่มชีววิทยาและอาคารในเยอรมนีตะวันตกและสหภาพโซเวียต (USSR)

IL 33: Radiolaria, 1990

นำเสนอโครงสร้างเปลือกบางในธรรมชาติ และเทคนิคการถ่ายภาพ Radiolaria in Sterocular Micrographs โดย เอลเมคเค (J.-G Helmcke) กระบวนการสร้างรูปทรงโดย บาค (K. Bach)

IL 34: The Model, 1989

ศึกษารูปแบบหุ่นจำลองเชือกแขวน (chain hanging model) ของแอนโทนี เกาดี (Antoni Gaudi) และการทดลองสร้างใหม่ตามเกาดี หัวข้อที่สองคือการพิจารณาเรื่องแสงในการออกแบบโบสถ์ Church of Colonia Güel ของเกาดี ซึ่งทั้งหมดเป็นวิทยานิพนธ์เอกของ โยส ทอมโลว์ (Jos Tomlow)

IL 35: Pneu and Bone, 1984

เนื้อหาในเล่มนี้เป็นการสำรวจตรวจสอบระบบโครงสร้างของ pneu ในธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต soft pneus, solid pneus, crustaceans และกระดูก

IL 36: Subjective standpoints in architecture and science, 1984

นำเสนอภาพรวมของงานศึกษาและวิจัยที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา ในโอกาสครบรอบ 20 ปี ของสถาบัน

IL 37: Ancient Architects, 1994

ไพโร โอทโท พยายามสืบค้นผลงานประดิษฐ์กรรมต่าง ๆ ของนักออกแบบในอดีต รวมถึงคุณูปการที่มีต่อประวัติศาสตร์ของการออกแบบโครงสร้าง

IL 38: Diatomen 2, 2004

การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาและการสังเคราะห์คุณลักษณะของไดอะตอมเพิ่มเติมจาก IL 28 ซึ่งตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1985

IL 39: Non-Planned Settlements, 1992

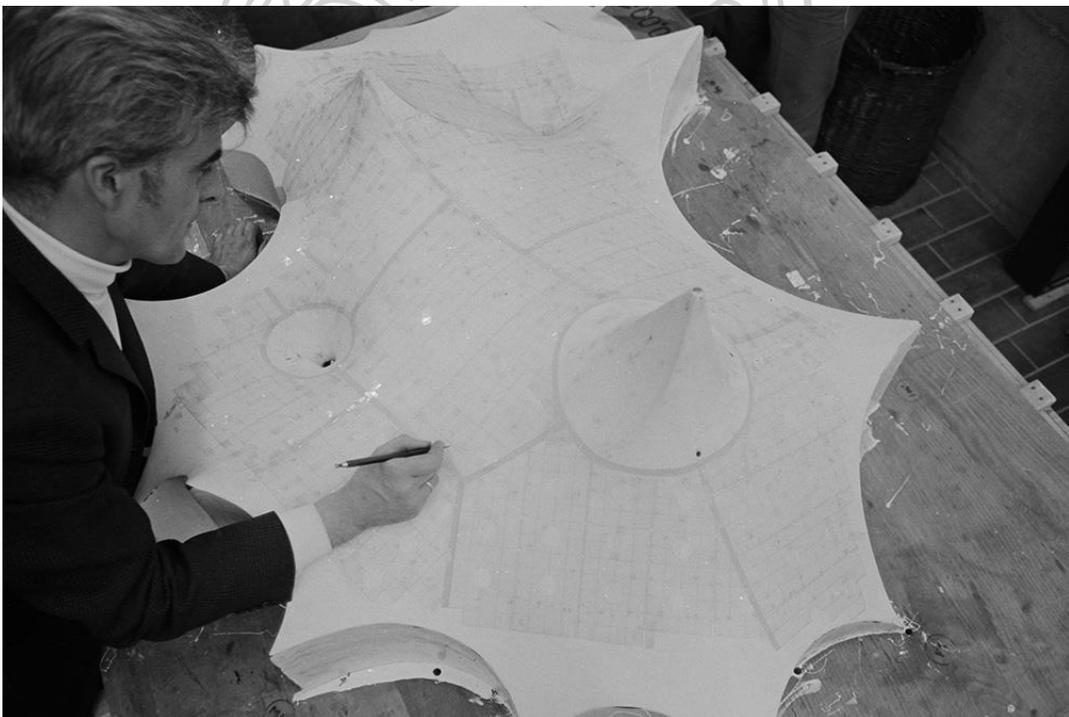
วิทยานิพนธ์ปริญญาเอกของเอดา ชาวเออร์ (Eda Schauer) อธิบายคุณสมบัติที่เป็นลักษณะ - ระบบทาง , พื้นผิว เขตในการครอบครองพื้นที่ ผลของกระบวนการจัดการตนเองขององค์กรต่อการก่อตัวของโครงสร้างในการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์ ในขั้นตอนที่สองผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับโครงสร้างการสร้างในธรรมชาติ

IL 41: Building with Intelligence, 1995

ลักษณะของวัฒนธรรมในการก่อสร้างอาคารที่แตกต่างกัน งานออกแบบใหม่ที่นักวางแผนสถาปนิกและวิศวกรต้องเผชิญ เพื่อที่จะเตรียมตัวแก้ปัญหาการเติบโตที่รวดเร็วของโลก



ภาพที่ 73 ไพร โอทโท และทีมงานกำลังถ่ายภาพหุ่นจำลองเพื่อนำไปวิเคราะห์
ที่มา: © Frei-Otto Werkarchiv, Südwestdeutsches Archiv für Architektur und
Ingenieurbau (saai), KIT



ภาพที่ 74 ไพร โอทโทและการทดลองวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหุ่นจำลอง
ที่มา: <https://www.archplus.net/home/news/7,1-13192,1,0.html>



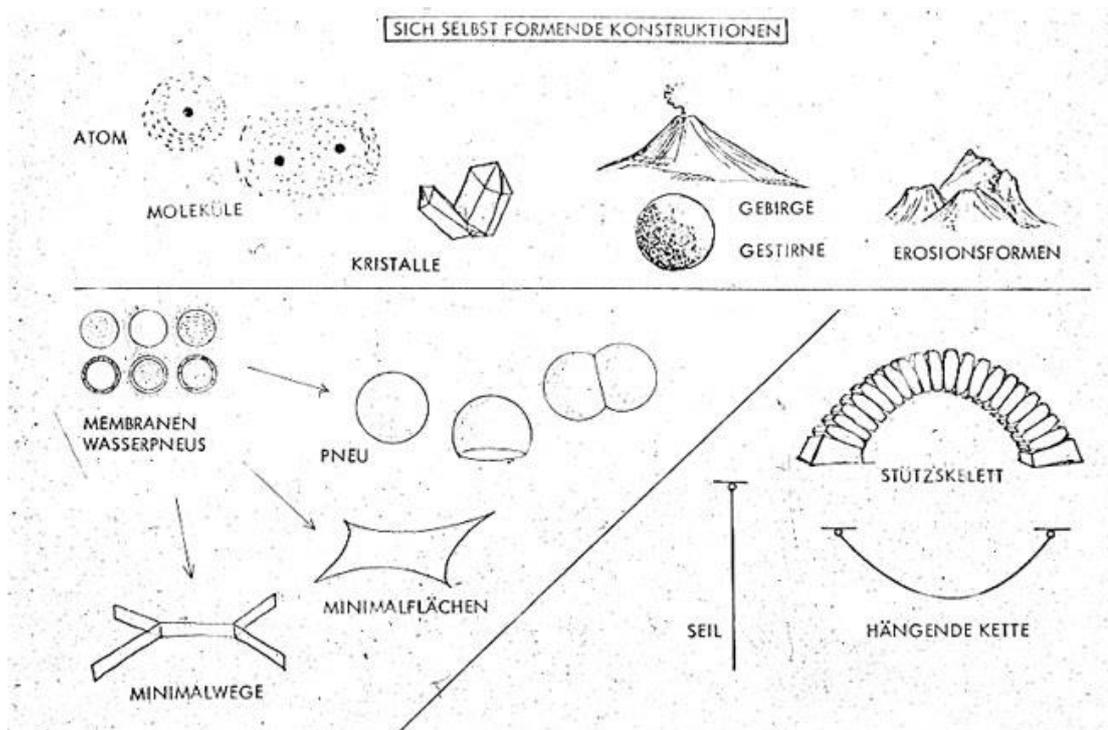
ภาพที่ 75 ไพร์ โอทโท ขณะกำลังถ่ายภาพหุ่นจำลอง

ที่มา: <https://www.archplus.net/home/news/7,1-13192,1,0.html>



ภาพที่ 76 ไพร์ โอทโท ขณะกำลังเตรียมอุปกรณ์ถ่ายภาพหุ่นจำลอง

ที่มา: <https://www.archplus.net/home/news/7,1-13192,1,0.html>



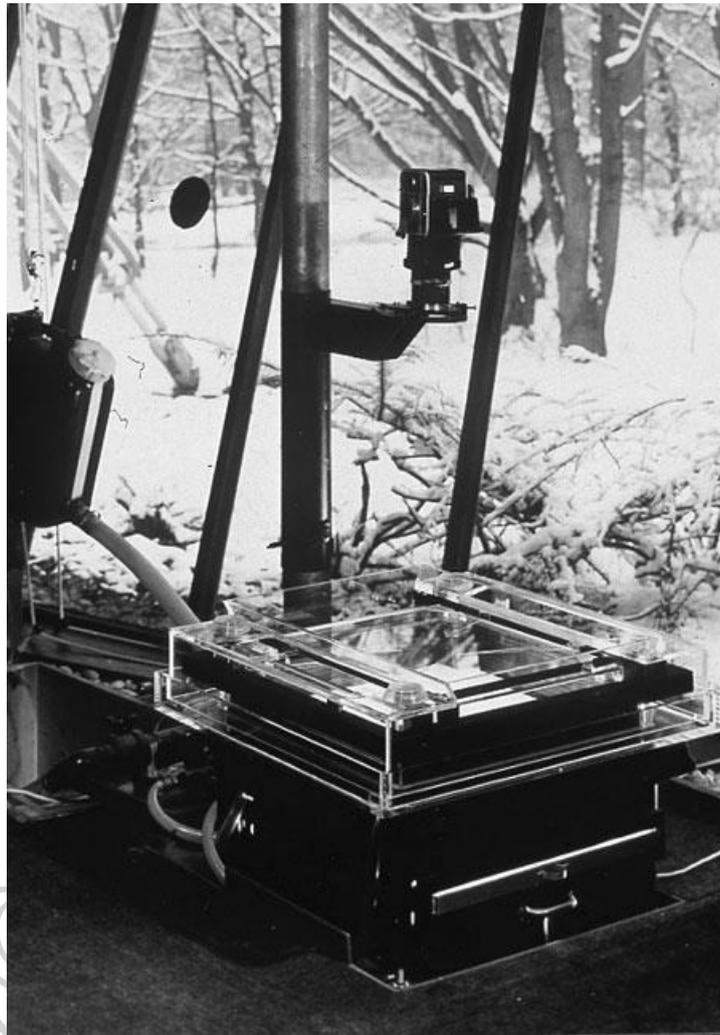
ภาพที่ 77 แผนภาพแสดงรูปทรงจากการศึกษาบางส่วนของ ไพร โอทโท

ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

3.2.3.1 อุปกรณ์พิเศษสำหรับการศึกษาและออกแบบ

สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ไพร์ โอทโทและสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาสร้างขึ้นคือ เครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากโอทโทต้องการศึกษารูปทรงที่มีความซับซ้อนสูง ประกอบกับรูปทรงเหล่านั้นต้องอาศัยการก่อรูปด้วยตนเองจากข้อจำกัดต่าง ๆ โอทโทจึงต้องสร้าง เครื่องมือเฉพาะขึ้น เช่นเครื่องมือสำหรับผลิตฟิล์มสบู่ เพื่อใช้ในการสร้างหุ่นจำลองของพื้นผิวของเมมเบรนสำหรับใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างเมมเบรนผ้าใบ เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1958 ไพร์ โอทโท และทีมงานได้ร่วมกันออกแบบเครื่องมือสำหรับสร้าง หุ่นจำลองระยะขจัด (minimum path device) ขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษาทดลอง อุปกรณ์นี้เป็นการ ประยุกต์การใช้ฟิล์มสบู่ร่วมกับอุปกรณ์ชิ้นอื่น ประกอบด้วยหัวเข็มขนาดเล็ก น้ำสบู่ และแผ่นกระจก ซึ่งถูกจุ่มลงไปใต้น้ำสบู่ทำให้เกิดแผ่นฟิล์มสบู่ขึ้น จากนั้นทำการถ่ายภาพแล้วนำไปวัดระยะและ วิเคราะห์ต่อไป อุปกรณ์นี้ช่วยในการหาระยะทางที่สั้นที่สุดจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และช่วยใน การออกแบบโครงสร้างที่มีลักษณะการสานกันเป็นซี่เล็ก ๆ (lattice structures) สามารถประยุกต์ใช้ ได้กับการออกแบบโครงสร้างไม้ เหล็ก และคอนกรีต



ภาพที่ 78 เครื่อง minimum path device

ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

สำหรับอุปกรณ์ชิ้นนี้ เป็นเครื่องมือหลักอันหนึ่งในการช่วยวิเคราะห์และวิจัยงานของลูกศิษย์ปริญญาเอกของโอทโท คือ เอดา ชาวเออร์ (Eda Schauer) ซึ่งศึกษาเรื่องระบบของเมืองและการเชื่อมต่อ (Otto and Schauer, 1992) โดยสมมติฐานของการศึกษานั้นเชื่อว่า เมืองนั้นเติบโตด้วยตัวเอง ไม่ได้ถูกวางผังโดยมนุษย์ การขยายตัวจะทำให้เกิดองค์ประกอบสองส่วนคือ พื้นที่ที่ถูกครอบครองโดยมนุษย์ และเส้นทางเชื่อมต่อแต่ละพื้นที่นั้น ๆ เข้าหากัน จนในที่สุดได้ผลลัพธ์เป็นรูปร่างของเมืองนั่นเอง เอกสารการศึกษาดังกล่าวถูกตีพิมพ์อยู่ในชุดของงานวิจัย IL ลำดับที่ 33 ชื่อ Ungeplantesiedlung หรือเมืองที่ไม่ได้ออกแบบ ต่อมาในปี ค.ศ. 2009 ได้มีการเรียบเรียงเนื้อหาและตีพิมพ์ใหม่ในชื่อ Frei Otto, Occupying and connecting: thoughts on territories and spheres of influence with particular reference to human settlement (Frei Otto,

Berthold Burkhardt, 2009) นอกจากจะมีที่มาจากงานของชาวเยอรมันแล้ว ยังได้นำเสนอวิธีการและเครื่องมือในการทดลองที่กว้างขวางขึ้นกว่าเดิม เช่น มีการทดลองใช้แม่เหล็กติดกับวัสดุแผ่น แล้วนำมาวางลอยในน้ำเพื่อสังเกตการเรียงตัวของวัสดุทดลองจนกลายเป็นรูปร่าง สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของระบบของรูปร่างโดยรวมเมื่อมีการเปลี่ยนจำนวนของแผ่นวัสดุทดลอง เป็นต้น

FIGUR	DIREKTWEGENETZ		MINIMIERTES UMWEGENETZ		MINIMALWEGENETZ		HÄUFIGKEIT	MA-SCHEN ZAHL	WINKEL			
	Systemlänge	Ø Wegelänge	Systemlänge	Ø Wegelänge	Systemlänge	Ø Wegelänge						
Gleichseitiges Dreieck		100%	100%		65%	113%		58%	113%	24	1	53°60' / 67°
Rechtwinkliges Dreieck		100%	100%		60%	114%		56%	112%	11	1	47°63' / 70°
Quadrat		100%	100%		68%	107%		38%	126%	16	3	47°60' / 73° 51'
Fünfeck		100%	100%		54%	107%		30%	155%	20	6	46°67' / 56°63' / 62°59' / 65°
Sechseck		100%	100%		49%	109%		22%	170%	11	11	49°63' / 68°40' / 60°80' / 53°67°
Freie Form		100%	100%		45%	106%		22%	116%	35	6	42°63' / 75°30' / 67°83' / 48°15' / 11°

ภาพที่ 79 ระยะเวลาจัด (minimum path) ที่ไฟโร โอทโท และทีมงานทดลองศึกษาด้วยเครื่อง minimum path device

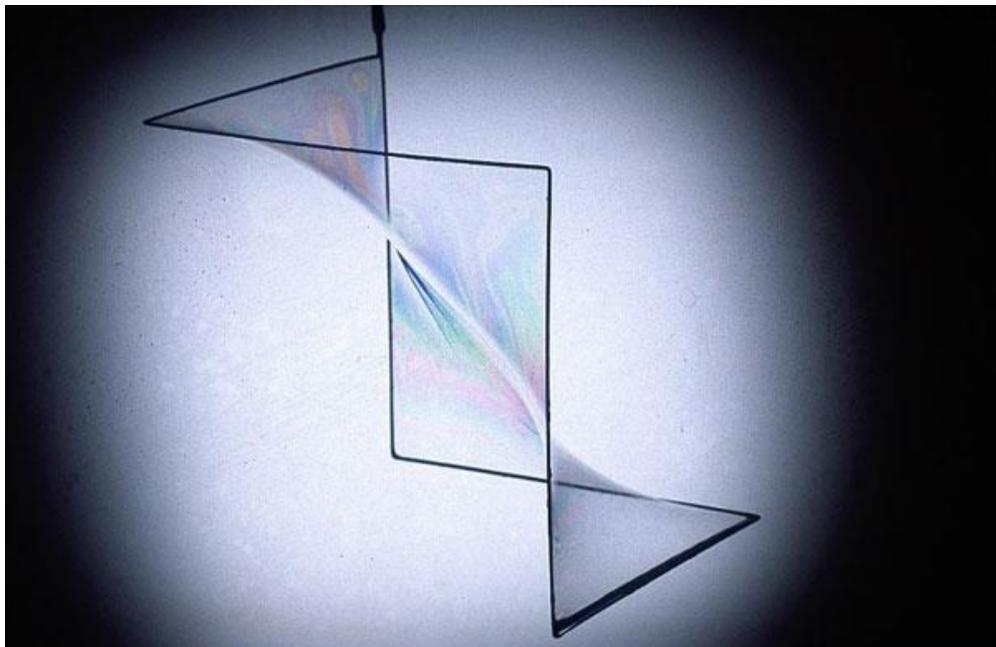
ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

นอกจากใช้ฟิล์มสบู่สำหรับการทดลองหาระยะขจัดแล้ว ทีมงานยังได้ใช้ฟิล์มสบู่เป็นสื่อในการค้นหารูปร่างและระนาบหรือพื้นผิวขจัดที่สุด ซึ่งในขณะนั้นเทคโนโลยีการสร้างหุ่นจำลองบนคอมพิวเตอร์ยังไม่สามารถสร้างรูปทรงที่มีความซับซ้อนเช่นนี้ได้ โอทโทและทีมงานได้สร้างเครื่องสร้างฟิล์มสบู่ (soap film machine) ขึ้นใช้สำหรับการทดลองในโครงการต่าง ๆ ที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของเขา ซึ่งการทำรูปทรงจากฟิล์มสบู่นี้ช่วยทำให้การออกแบบ และวิเคราะห์โครงสร้างโครงสร้างประเภทแผ่นและเมมเบรน (membrane) มีความเป็นไปได้ใกล้เคียงการก่อสร้างจริงมาก อุปกรณ์ชิ้นนี้เป็นอุปกรณ์หลักที่ช่วยให้โอทโทและทีมงานได้เห็นหุ่นจำลองของระนาบหรือพื้นผิวขจัดที่สุด (minimum surface) อันเกิดจากกำหนดขอบของพื้นที่ และสามารถตรวจวัดระยะจริงได้



ภาพที่ 80 เครื่องสร้างหุ่นจำลองจากฟิล์มสบู่

ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

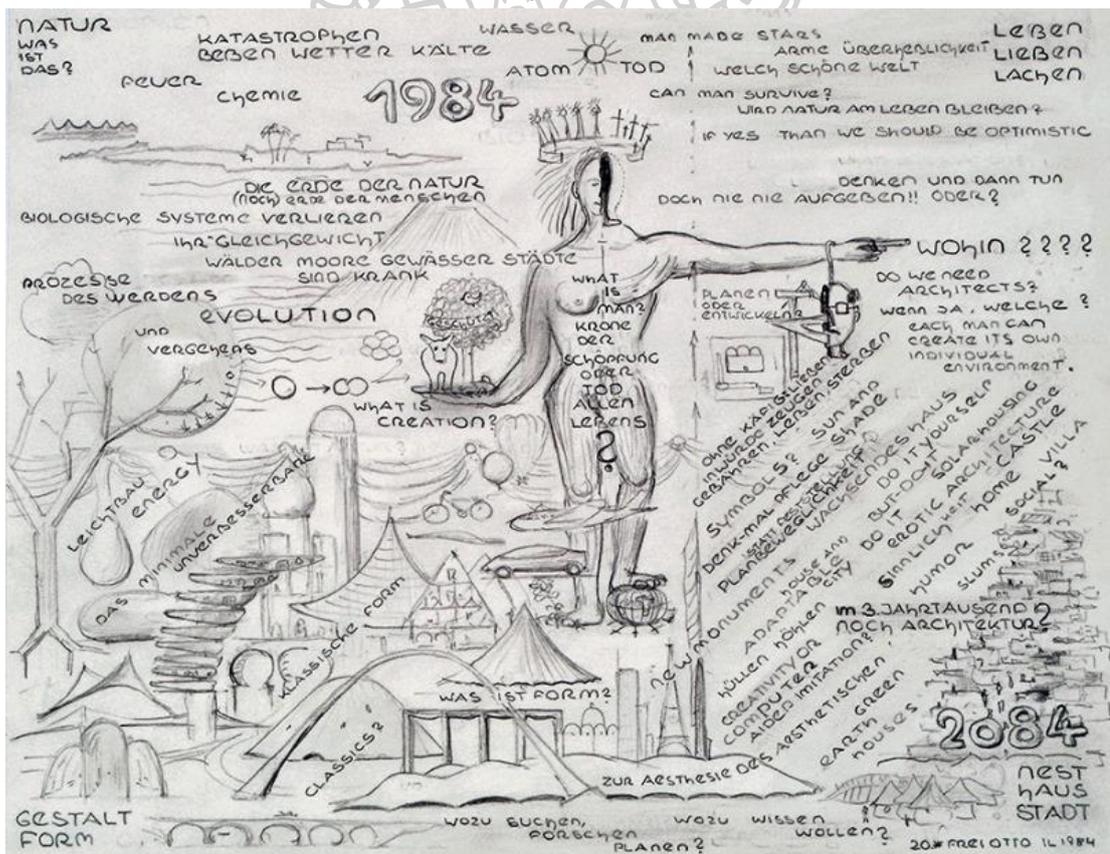


ภาพที่ 81 รูปทรงของฟิล์มสบู่ที่ได้จากเครื่องมือ

ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

3.2.4 SFB 230 (Sonderforschungsbereich 230)

หลังจากได้สร้างกลุ่มวิจัยเฉพาะที่มีความเข้มแข็งในการศึกษาและทดลองเรื่องโครงสร้างเบามาเป็นระยะเวลาหนึ่ง ไพร โอทโท ได้รับทุนวิจัยจากรัฐบาลในโครงการ Sonderforschungsbereich 230 (SFB230) เป็นจำนวนเงินสูงถึง 2,000,000 มาร์ค (ตามสกุลเงินเยอรมันขณะนั้น) ผูกพันระยะเวลา 15 ปี โอทโทและทีมงานได้เริ่มงานวิจัยตั้งแต่ปี ค.ศ. 1984 เป็นต้นมา จนกระทั่งเกษียณ สำหรับประเด็นหลักในโครงการวิจัยนี้คือเรื่อง การก่อสร้างระบบธรรมชาติ („Natürliche Konstruktionen – Leichtbau in Architektur und Natur“) หลักการหนึ่งที่โอทโทกล่าวถึงโครงสร้างในธรรมชาติคือ โครงสร้างทั้งในสิ่งที่มีชีวิตหรือไม่มีชีวิตก็ตาม จะมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่รวมกันจากผลของแรงกระทำหรือข้อจำกัดต่าง ๆ ในธรรมชาติที่มีต่อวัตถุนั้น ๆ ซึ่งกระบวนการทางธรรมชาตินี้เอง โอทโทเรียกว่า การก่อรูปโดยตนเอง (self-formation) (Frei Otto, 1982) (Frei Otto, 1988) หมายความว่า รูปทรงต่าง ๆ นั้น ไม่ได้เกิดจากการออกแบบแต่เกิดจากกระบวนการบางอย่างในธรรมชาติที่กระทำให้มีรูปทรงนั้น ๆ เป็นผลลัพธ์



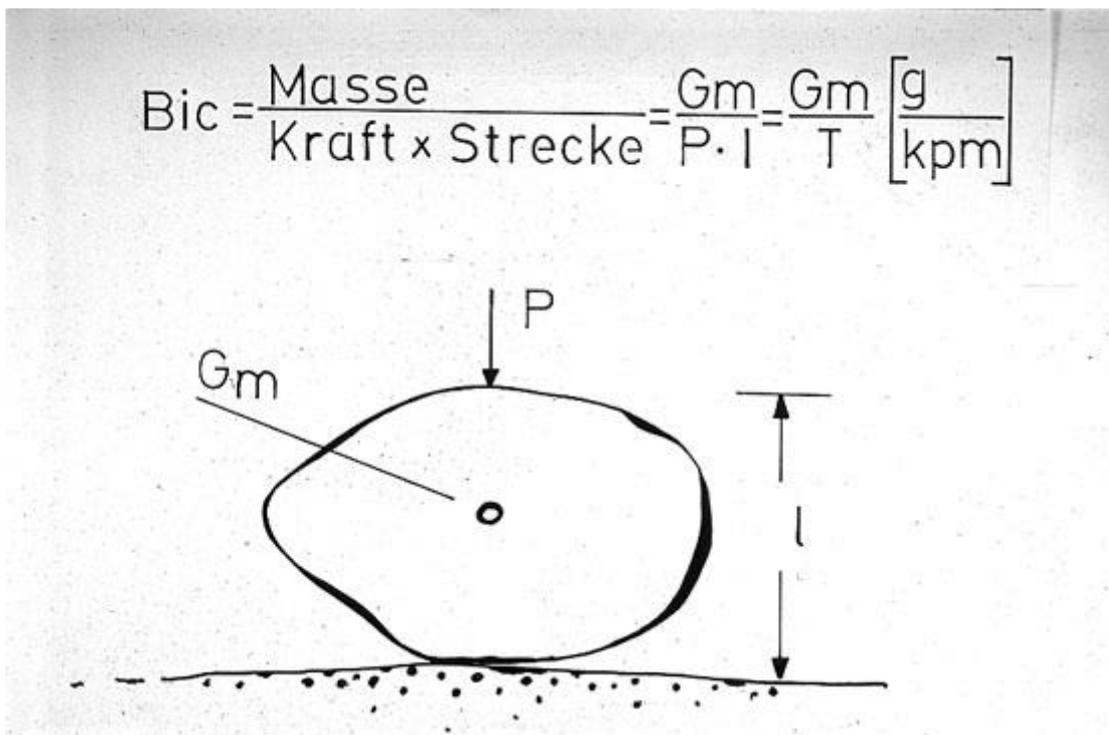
ภาพที่ 82 ภาพสเก็ตช์แนวความคิดของไฟร โอทโท ซึ่งเขียนขึ้นในปี ค.ศ. 1984

ที่มา: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Pritzker_Preis_2015_posthum_an_Frei_Otto_LEhttp_www.freiotto.de_www_2306294.html

จากการศึกษารูปทรงในธรรมชาติจำนวนมาก ทำให้เกิดข้อสังเกตว่า รูปทรงต่าง ๆ เหล่านั้นมักจะครอบคลุมพื้นที่หรือก่อรูปขึ้นโดยมีน้ำหนักตัวเองน้อยที่สุด ไพร โอทโท จึงได้นำเสนอหลักการในการออกแบบที่สามารถตรวจวัดได้และสามารถคำนวณเป็นตัวเลขได้ขึ้นมา เรียกว่าสมการ BIC (Otto, 1982) โดยหลักการของโครงสร้างเบาคือ รูปทรงที่ดีเกิดจากการใช้วัสดุที่น้อย แต่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการรับน้ำหนักกระทำ โครงสร้างของสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาติทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต ต่างตั้งอยู่บนหลักการประหยัดนี้ หลักการนี้อาจเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ของมวลของรูปทรงและแรงกระทำ (BIC) ได้ ดังนี้

$$\text{Bic} = m / (F * s)$$

- หมายเหตุ
- m = มวลของโครงสร้าง มีหน่วยเป็นกรัม
 - F = แรงกระทำที่โครงสร้าง มีหน่วยเป็นนิวตัน
 - s = ระยะทางที่แรงกระทำในโครงสร้าง มีหน่วยเป็นเมตร

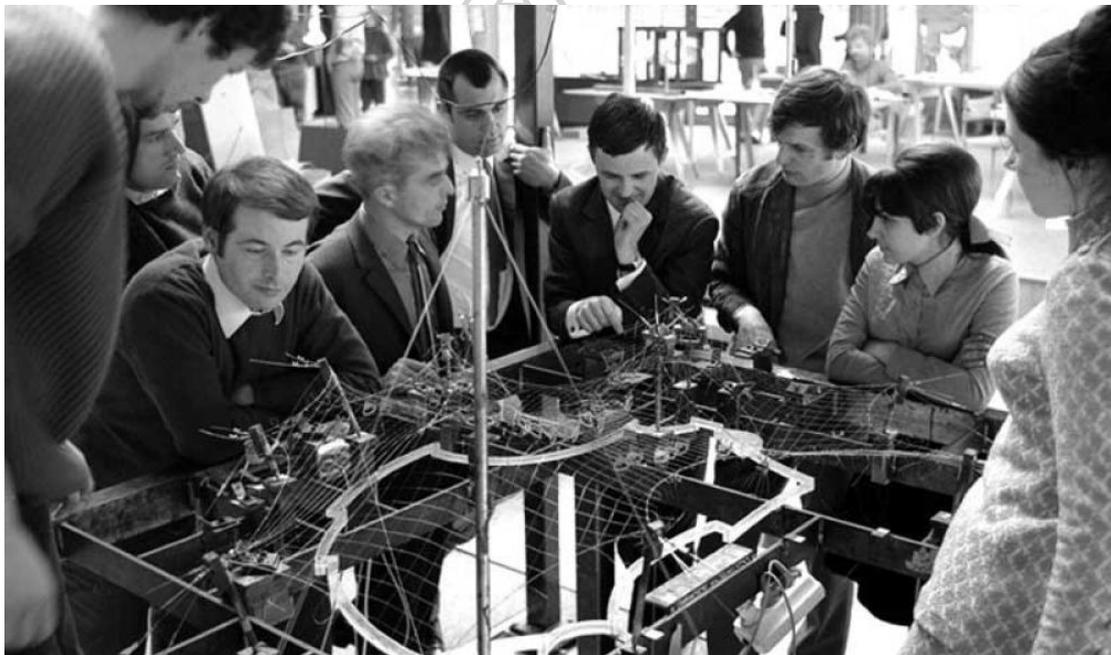


ภาพที่ 83 กราฟฟิกประกอบสมการ BIC

ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

ไพร โอทโท เกษียณอายุจากการเป็นศาสตราจารย์ประจำมหาวิทยาลัยชตุทการ์ท และการเป็นผู้อำนวยการสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาที่เขาก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1991 ในขณะที่ยังคงไม่หมดสติตามระยะเวลา แต่

โครงการดังกล่าวก็ต้องถูกปิดตัวลงไปตามวาระการทำงานของผู้อำนวยการโครงการ ตัวสถาบันเองถูกปรับเปลี่ยนทิศทางการวิจัยไปตามนโยบายของมหาวิทยาลัย โดยปรับเป็นสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาและการก่อสร้าง (Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren) มีแวร์เนอร์ โซเบ็ค (Werner Sobek) เป็นผู้อำนวยการสถาบัน ซึ่งทิศทางในการศึกษาวิจัยถูกเปลี่ยนไปเน้นเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานมากกว่าการออกแบบโครงสร้างเบาตามที่เคยเป็นมา (ไฟรโอทโทให้สัมภาษณ์โซเจิล เมื่อปี ค.ศ. 2004) (Frei Otto, Juan-Maria Songel, 2010: 63-64) อย่างไรก็ตาม ผลงานการศึกษาวิจัยทั้งหมดของไฟร โอทโท ยังคงเป็นเอกสารทางวิชาการที่สำคัญสำหรับผู้สนใจในปัจจุบันให้นำมาพัฒนาต่อไป



ภาพที่ 84 ไฟร โอทโท ขณะอธิบายการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหุ่นจำลอง

ที่มา: <https://www.bauwelt.de/themen/bilder/Frei-Otto-2298991.html>

เห็นได้ชัดเจนมากกว่า โดยภาพรวมชีวิตการทำงาน ไฟร โอทโท ปฏิบัติงานทั้งสองด้านคือด้านวิชาชีพและวิชาการ โดยใช้การศึกษาค้นคว้าเป็นฐานในการใช้ประกอบการทำงานออกแบบ เป็นการผสมผสานความรู้ทางทฤษฎีสู่การปฏิบัติ ทำให้ความรู้จากการศึกษาค้นคว้าถูกนำไปใช้แก้ปัญหาในการออกแบบจริง ในขณะเดียวกันก็สามารถสะท้อนปัญหาจากการนำไปใช้จริงย้อนกลับเข้ามาสู่กระบวนการศึกษาและทดลอง เพื่อนำไปพัฒนาในงานออกแบบขั้นต่อไป ดังเห็นได้จากพัฒนาการในการทำงานออกแบบ จากการออกแบบโครงสร้างเต็นท์ผ้าใบในช่วงแรก ขยายสัดส่วนเป็นโครงสร้างที่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดกว้างใหญ่ขึ้นในเวลาต่อมา เช่น โครงการศาลาเยอรมัน 1967 และหลังคาคลุม

สนามกีฬาโอลิมปิกที่มิวนิก เป็นต้น นอกจากนั้นการศึกษาทดลองยังนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างใหม่อื่น ๆ อีก เช่น การพัฒนาโครงสร้างกริดเปลือกบาง การพัฒนาระบบโครงสร้างอัดอากาศ

สำหรับการใช้หลักการกลับด้านของรูปทรงเพื่อเปลี่ยนระบบของแรงกระทำนั้น เห็นได้จากตัวอย่างศาลาในงานนิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองมันนีโฮล์ม ในปี ค.ศ.1975 ซึ่งโอทโทและทีมงานได้เริ่มต้นจากการทำหุ่นจำลองแบบเชือกแขวน จากนั้นจึงถ่ายภาพหุ่นจำลอง แล้วกลับด้านของรูปถ่ายเพื่อให้ได้รูปทรงของโครงสร้างรับแรงอัดแทน ในส่วนของตัวโครงสร้างจริง โอทโท เลือกใช้ไม้ขนาดเล็ก นำมาสานกันเป็นระบบตาตาราง โครงสร้างนี้จึงเปลี่ยนจากพฤติกรรมการรับแรงดึงที่ผิว (membrane) เป็นโครงสร้างเปลือกบาง (shell) และ ไฟร โอทโท เรียกโครงสร้างของเขาว่า โครงสร้างเปลือกบางระบบตาตาราง (grid shell)



บทที่ 4

การแตกกระแสนของแนวความคิดในการออกแบบหลังจากยุคสมัยของ ไฟร โอทโท

ปรัชญาการออกแบบตามแนวทาง การก่อสร้างแบบธรรมชาติ ของไฟร โอทโท นำมาซึ่งคำถามปลายเปิดในการศึกษา ทดลอง เพื่อหาความเป็นไปได้ของกระบวนการก่อรูปของสิ่งมีชีวิต สิ่งไม่มีชีวิตในธรรมชาติ และงานออกแบบโดยมนุษย์ที่ไม่แสดงตัวตนของผู้ออกแบบ การก่อสร้างแบบธรรมชาติไม่ใช่การลอกเลียนกายภาพ แต่เน้นที่ระบบ โดยเฉพาะการเจริญเติบโตหรือปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เป็นปัจจัยให้เกิดการก่อรูปด้วยตนเอง

หลังจากไฟร โอทโทเกษียณจากการเป็นผู้อำนวยการสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา เมื่อปี ค.ศ. 1991 ทิศทางการศึกษา วิจัย ของตัวสถาบันวิจัยของเขาที่มหาวิทยาลัยชตุทการ์ทก็เปลี่ยนทิศทางไป โดยมีการปรับชื่อสถาบันเป็น สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาและการก่อสร้าง (Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, ILEK) นำโดยผู้อำนวยการคนใหม่ แวร์เนอร์ โซเบ็ค (Werner Sobek) ซึ่งปรับทิศทางการวิจัยของสถาบันไปสู่การอนุรักษ์พลังงานในอาคาร ต่อมาเกิดการสร้างสถาบันใหม่เพิ่มเติมอีกสองสถาบันคือ สถาบันคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบและก่อสร้าง (Institute for Computational Design and Construction, ICD) นำโดย อาคิม เมงเงส (Achim Menges) เป็นกลุ่มที่นำเอาเทคโนโลยีดิจิทัลผ่านซอฟต์แวร์และคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบ และสถาบันการก่อสร้างและการออกแบบโครงสร้าง (Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, ITKE) มุ่งการพัฒนาโครงสร้างจากกายภาพของโครงสร้างสิ่งมีชีวิต นำโดย ยาร์ห์น คนิพเพอร์ส (Jahn Knippers)

4.1 กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานในอาคาร Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)

หลังจากไฟร โอทโท เกษียณอายุจากมหาวิทยาลัยชตุทการ์ทและผู้อำนวยการสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาแล้ว แวร์เนอร์ โซเบ็ค เป็นผู้ที่รับช่วงต่อสถาบันจากเขา สิ่งที่สถาบันให้ความสนใจนั้นมีประเด็นที่เบี่ยงไปในทางวิศวกรรมมากขึ้น โดยเฉพาะเรื่องการบริโภคพลังงานในอาคาร นำไปสู่การวิจัยวัสดุก่อสร้างใหม่ ๆ ที่มีประสิทธิภาพในเชิงการเป็นฉนวนมากขึ้น ซึ่งไฟร โอทโทเห็นว่าไม่ใช่แนวทางการออกแบบโครงสร้างเบาอีกต่อไป (Otto, 2010)

ในปี ค.ศ. 1994 โซเบ็ค ได้เชิญวิศวกรระดับแนวหน้า เยิร์ก ชเล็ค (Jörg Schlaich) เข้ามาร่วมเป็นทีมงาน เพื่อให้สถาบันมีความเป็นเลิศทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น ด้วยประสบการณ์การ

ทำงานของบริษัท Schlaich Bergermann Partner ในระดับนานาชาติซึ่งมีสาขาอยู่ 5 เมืองหลักทั่วโลก ทำให้ทิศทางของการศึกษาศาสนาเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ดี ทางสถาบันยังคงมีหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษาที่พยายามจะผสมผสานความรู้ข้ามศาสตร์ระหว่างสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมอยู่ โดยใช้ชื่อหลักสูตร Master of Science in Architecture Specialization แบ่งการศึกษาออกเป็นสามกลุ่มหลักคือ การออกแบบโครงสร้างเบา การออกแบบโครงสร้างที่ขยับได้ และวิศวกรรมโครงสร้างทั่วไป โดยทั้งหมดต้องมีประเด็นเกี่ยวข้องกับการพลังงาน

นอกจากนั้น ในปี ค.ศ.2016 โซเบ็ค ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยในโครงการ SFB 1224 เพื่อศึกษา วิจัย การออกแบบโครงสร้างสำหรับอาคารสูงโดยเฉพาะ ซึ่งโซเบ็คพยายามรวบรวมนักวิจัยจากสถาบันต่าง ๆ ที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะมาทำการศึกษาร่วมกัน



ภาพที่ 85 ผลงานออกแบบโครงสร้างอาคารสูงบางส่วนตามโครงการวิจัย SFB 1224

ที่มา: <https://www.bautex-bw.de/index/premium-aussteller/institut-f%C3%BCr-leichtbau-entwerfen-und-konstruieren>

4.2 กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาเครื่องมือออกแบบด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ Institute for Computational Design and Construction (ICD)

ในยุคสมัยของไฟโร โอทโทนั้น เครื่องมือหลักที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาการออกแบบและการทดลองทั้งหลายคือการทำหุ่นจำลองกายภาพ เพื่อการถ่ายรูป วัดระยะ หรือวิเคราะห์แรงกระทำด้วยอุปกรณ์ช่วยอื่น ๆ เช่น อูมิงค์ลม เป็นต้น คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ไฟโร โอทโทให้ความสำคัญสำหรับเป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์แรงกระทำสำหรับการคำนวณเท่านั้น ซึ่งไฟโร โอทโทเชื่อว่าคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องคำนวณ แต่ไม่ใช่เครื่องมือในการออกแบบ (Otto, 2010)

เมื่อเทคโนโลยีทางซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์มีพัฒนาการที่รุดหน้าไปมากในช่วงระยะ 20 ปีที่ผ่านมา ทำให้มีการศึกษาและนำเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบสถาปัตยกรรมมากขึ้น

อาคิม เมงเงส ได้นำเสนอกระบวนการและเครื่องมือในการออกแบบใหม่ด้วยการใช้ความสามารถของวิทยาการคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ โดยเน้นความสามารถด้าน parametric and algorithmic design strategies ของคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้จะใช้สำหรับการออกแบบรูปทรงต่าง ๆ แล้ว ยังถูกใช้เป็นเครื่องมือในการเตรียมชิ้นส่วนวัสดุเพื่อนำไปประกอบสร้าง (fabrication) ด้วย ซึ่งเมงเงสเห็นว่า คอมพิวเตอร์นั้นเป็นเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพสำหรับการทำงานในทุกกระบวนการ ตั้งแต่การสร้างรูปทรง การสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ และในกระบวนการผลิตและติดตั้ง นำไปสู่ประเด็นศึกษาวิจัยสองแนวทางของสถาบัน คือ การศึกษาวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการสร้างรูปทรงโดยคอมพิวเตอร์ และการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในกระบวนการผลิต โดยผสมเข้ากับหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษาของสถาบัน (International M.Sc. Programme: ITECH Integrative Technologies and Architectural Design Research)



ภาพที่ 86 ผลงานการศึกษาและออกแบบโดยสถาบัน ICD

ที่มา: icd.uni-stuttgart.de

4.3 กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการออกแบบโครงสร้างโดยมีต้นแบบจากสิ่งมีชีวิต Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)

จากการที่ไฟร โอทโท ร่วมกับ โยฮันน์ เฮลเมคเค ก่อตั้งหน่วยวิจัยพิเศษขึ้นโดยการผสานเอาชีววิทยาเข้ามาเป็นประเด็นในการศึกษาเพื่อพัฒนาการออกแบบโครงสร้างเบาเมื่อปี ค.ศ. 1961 นั้น ทำให้เกิดการศึกษาวิจัยเรื่องธรรมชาติมากมาย ประเด็นหนึ่งคือ การศึกษาจากต้นแบบทางกายภาพของสิ่งมีชีวิต ซึ่งไฟร โอทโท เรียกว่า Bionik (Otto, 1976) ซึ่งเป็นคำที่มีความคล้ายกับคำว่า Bionic ในภาษาอังกฤษ ซึ่งเคยมีผู้ใช้คำนี้มาก่อนหน้าคือ แจ็ค อี. สตีล (Jack E. Steele) อดีตบุคลากรทางการแพทย์ของฐานทัพอากาศสหรัฐอเมริกา โดยเป็นการนิยามถึงการผสมผสานรักษาพยาบาลผู้ป่วยที่สูญเสียอวัยวะโดยการใช้นวัตกรรมการประดิษฐ์ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์เฉพาะผสมเข้ากับร่างกายมนุษย์ จะเห็นได้ว่าความหมายของไฟร โอทโท นั้นแตกต่างจากความหมายของ สตีล

สำหรับแนวคิดเรื่องการศึกษากายภาพของโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาการออกแบบโครงสร้างนี้ ได้รับการพัฒนาต่อมาที่สถาบันการก่อสร้างและการออกแบบโครงสร้าง นำโดย ยาร์ห์น คินิเพอร์ส ซึ่งมีภูมิหลังเป็นวิศวกรโครงสร้าง ซึ่งมีแนวทางการศึกษาวิจัยการออกแบบโครงสร้างพิเศษ การพัฒนาวัสดุประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้เป็นโครงสร้าง โดยเฉพาะวัสดุเส้นใย ทั้งนี้ เน้นการศึกษากายภาพของโครงสร้างสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาการออกแบบโครงสร้าง

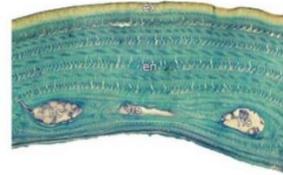
อย่างไรก็ดี การทำงานของสถาบัน ICD และ ITKE นั้น มักมีลักษณะร่วมมือกันเสมอ โดย ICD มักจะทำงานในส่วนของการออกแบบรูปทรง โดยมี ITKE เป็นวิศวกรวิเคราะห์และคำนวณโครงสร้างให้ เห็นได้จากการร่วมกันออกแบบและก่อสร้างศาลา (pavilion) ร่วมกันทุกปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 เป็นต้นมา เรียกว่า ICD/ITKE Research Pavilion ซึ่งจะคัดจากผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทของนักศึกษาที่มีความน่าสนใจขึ้นมาจำนวน 1 งาน จากนั้นนำมาพัฒนา ผลิต และก่อสร้างเป็นอาคารจริง



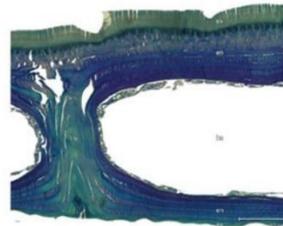
ภาพที่ 87 ICD/ITKE Research Pavilion 2010
 ที่มา: icd.uni-stuttgart.de



Trigonopterus nasutus | Ground Beetle



Cetonia aurata | Flying Beetle



ภาพที่ 88 การศึกษาเปลือกแข็งของแมลงเพื่อพัฒนาเป็นศาลา Research Pavilion 2014
 ที่มา: icd.uni-stuttgart.de



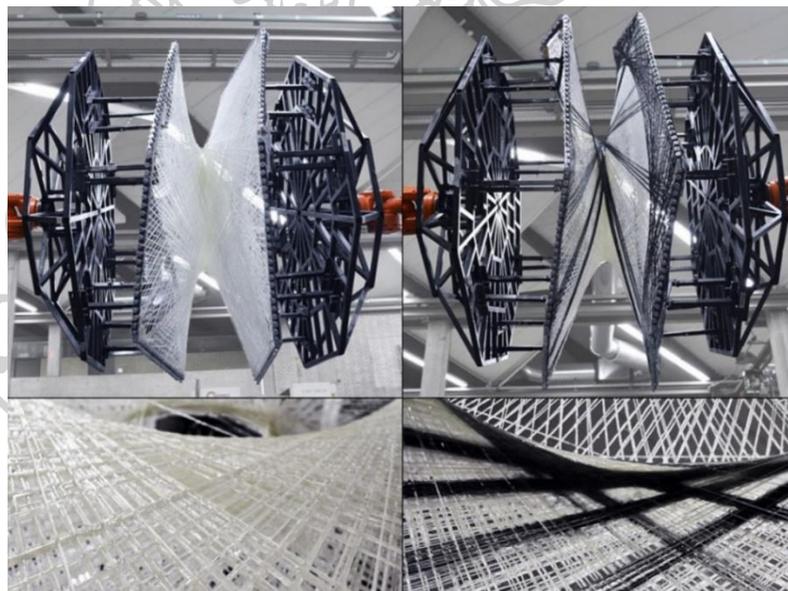
ภาพที่ 89 Research Pavilion 2014

ที่มา: icd.uni-stuttgart.de





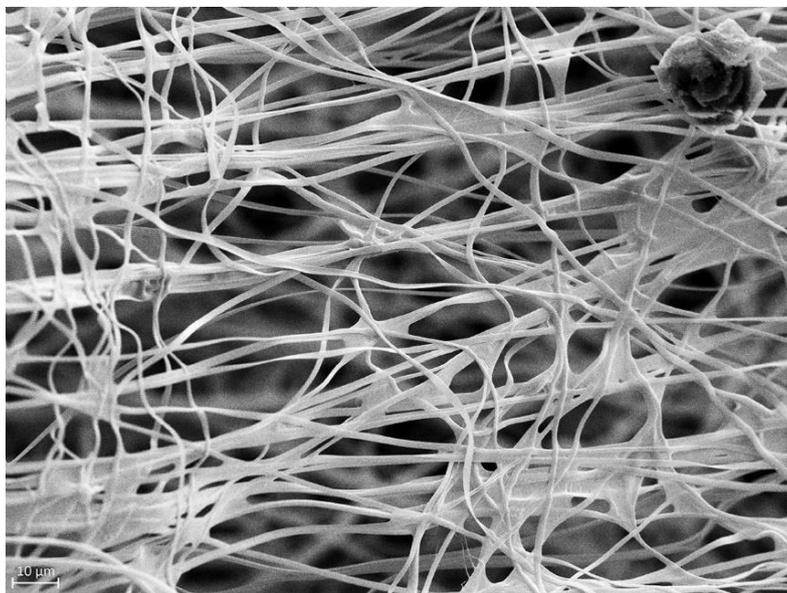
ภาพที่ 90 การประสานการใช้เครื่องจักรอัตโนมัติสมัยใหม่สำหรับการเตรียมชิ้นวัสดุและการก่อสร้าง
ที่มา: icd.uni-stuttgart.de



ภาพที่ 91 การสานวัสดุเส้นใยสำหรับการก่อสร้างอาคาร Research Pavilion 2014
ที่มา: icd.uni-stuttgart.de

การพัฒนาการออกแบบ กระบวนการออกแบบ และการก่อสร้างศาลาของ ICD และ ITKE นั้นเชื่อมโยงโดยตรงกับการศึกษาต้นแบบจากโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต ดังที่ไฟร โอทโท เคยได้เริ่มศึกษาไว้ในอดีต โดยทั้งสองสถาบันได้แสวงหาความร่วมมือกับนักชีววิทยาเพื่อเข้ามาช่วยในโครงการศึกษาด้วย โดยได้รับความร่วมมือจากมหาวิทยาลัยทือบิงเงน (University of Tübingen) แต่ได้

พัฒนาเรื่องการใช้เทคโนโลยีวัสดุใหม่ และเครื่องมือใหม่ในการก่อสร้าง อาทิเช่น แขนกลในระบบการผลิตแบบอุตสาหกรรม โดรน เป็นต้น



ภาพที่ 92 ภาพโครงสร้างของรังดักแด้ของผีเสื้อชนิดหนึ่ง ในการพัฒนา Research Pavilion 2016
ที่มา: icd.uni-stuttgart.de

เมื่อพิจารณาแนวคิดหลักของไฟร โอทโท เทียบเคียงกับสามกลุ่มแนวคิดที่พัฒนาต่อมา หลังจากหมดยุคสมัยของไฟร โอทโทและสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา (IL) นั้น จะพบว่า กลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานในอาคารเป็นหลัก (ILEK) นั้น เป็นกลุ่มที่มุ่งประเด็นการออกแบบไปที่ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความร้อน ความเย็น การถ่ายเทอากาศ รวมถึงการแก้ปัญหาเรื่องวัสดุ เช่น การใช้ฉนวน การใช้กระจก เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการออกแบบรูปทรง แต่ไม่ได้พิจารณาเรื่องมวล และระบบการถ่ายน้ำหนักกระทำในโครงสร้างตามแนวคิดของการออกแบบโครงสร้างเบามากนัก

สำหรับกลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการพัฒนาเครื่องมือออกแบบด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ (ICD) นั้น มีการทดลองสร้างหุ่นจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรมต่าง ๆ ที่มีความสามารถสูง มีการป้อนข้อมูลที่เป็นเงื่อนไขสำหรับการออกแบบแล้วให้คอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลตามแนวทางของการออกแบบแบบประสานปัจจัย (Parametric design) ซึ่งในยุคสมัยของไฟร โอทโทนั้น ไม่เชื่อว่าคอมพิวเตอร์มีความสามารถคิดได้แบบมนุษย์ อย่างไรก็ตามความสามารถในการสร้างรูปทรงตามแนวทางของ Parametric design นั้น ก็มีข้อจำกัดเรื่องปัจจัยที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม ในกรณีที่ไม่ใช่ข้อมูลบางหรือปัจจัยบางอย่าง คอมพิวเตอร์ก็จะคำนวณและประมวลผลตามข้อมูลเท่าที่ได้รับเท่านั้น และมักพบว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์กลายเป็นเครื่องมือใน

การสร้างรูปทรง (form making) ของผู้ออกแบบ มากกว่าถูกใช้เพื่อการค้นหารูปทรง (form finding) ตามแนวคิดของไฟร โอทโท แม้ว่าปัจจุบันมีความพยายามพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ขั้นสูงที่มีความสามารถในการคิดได้เอง แต่ก็ยังไม่มีผลการศึกษาที่ชัดเจนว่าคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการออกแบบสถาปัตยกรรมได้

เนื่องจากกลุ่มความคิดที่ให้ความสำคัญกับการออกแบบโครงสร้างโดยมีต้นแบบจากสิ่งมีชีวิต (ITKE) นั้น นำโดยวิศวกรโครงสร้าง ดังนั้นจึงมีการนำเอาหลักการในการออกแบบโครงสร้างที่เรียกว่าแบบประโยชน์สูงสุด หรือ optimization design มาใช้ โดยมักศึกษาต้นแบบจากโครงสร้างที่พบในสิ่งมีชีวิตและธรรมชาติ แล้วใช้คอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์คำนวณโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม แนวทางการหยิบยืมรูปร่าง รูปทรง จากสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาตินั้น ไม่ใช่แนวทางที่ไฟร โอทโท สนับสนุน แต่ไฟร โอทโท เสนอให้ศึกษากระบวนการในการก่อรูปด้วยตนเองในธรรมชาติเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบมากกว่า และการทำงานของกลุ่มนี้มักเป็นการทำงานในเชิงรับ คือมักให้ ICD เป็นผู้ออกแบบรูปทรงก่อน แล้วกลุ่ม ITKE จึงเข้ามาทำหน้าที่ช่วยวิเคราะห์และคำนวณโครงสร้าง และแก้ปัญหาเชิงเทคนิค กล่าวคือ ICD ทำหน้าที่เป็นสถาปนิก และ ITKE ทำหน้าที่เป็นวิศวกร การทำงานแบบประสานร่วมมือกันในกระบวนการออกแบบจึงยังไม่เป็นการบูรณาการร่วมกันอย่างแท้จริง

จากการศึกษาและวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า กลุ่มแนวคิดสามกลุ่มที่พัฒนาต่อมาจากสิ้นสุดสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของไฟร โอทโทนั้น เป็นกลุ่มย่อยภายใต้แนวคิดหลักของการออกแบบโครงสร้างเบาของไฟร โอทโทเดิม อย่างไรก็ตาม ยังเห็นการประสานสัมพันธ์กันในการพัฒนาการออกแบบระหว่างสถาบันอยู่ เช่น มีโครงการศึกษา วิจัย หรืองานออกแบบร่วมกันอยู่บ้าง

บทที่ 5

บทสรุปแนวความคิดในการออกแบบของ ไฟร โอทโท

ในบทที่ 2, 3 และ 4 ผู้ศึกษาได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับไฟร โอทโท ในประเด็นต่าง ๆ ทั้งทางด้านประวัติส่วนตัว การศึกษา ผลงานการศึกษาค้นคว้าที่สำคัญทั้งในระดับงานเพื่อขออนุมัติจบการศึกษา โดยเฉพาะผลงานดุษฎีนิพนธ์เรื่อง Das hängende Dach ซึ่งเปรียบเสมือนคำประกาศในออกแบบของเขา รวมถึงงานศึกษาค้นคว้าและทดลองที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา ซึ่งสัมพันธ์กับการประยุกต์ใช้ในการออกแบบในโครงการต่าง ๆ ที่มีการก่อสร้างจริง ในบทที่ 5 นี้ จะเป็นการวิเคราะห์ละเอียดเกี่ยวกับแนวความคิดในการออกแบบของ ไฟร โอทโท โดยแบ่งเป็นประเด็นต่าง ๆ เพื่อทำความเข้าใจแนวความคิดของ ไฟร โอทโทให้เป็นระบบและมีความชัดเจน แล้วจึงสรุปผลการศึกษาดังนี้

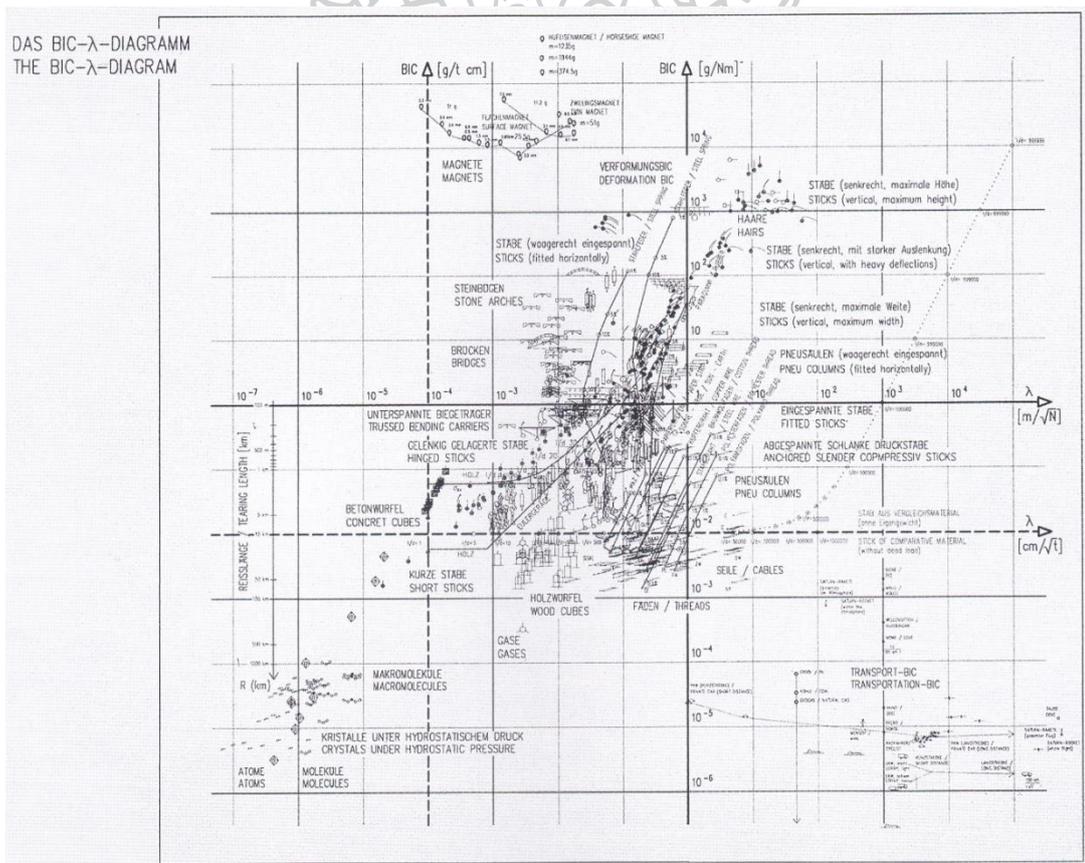
5.1 วิเคราะห์แนวคิดหลัก

งานออกแบบของไฟร โอทโท เป็นการศึกษา ทดลอง เพื่อออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ด้วยความรู้ความเข้าใจจากการทดลอง ทำให้โอทโทปรับเปลี่ยนรูปทรงของโครงสร้างเป็นโครงสร้างรับแรงอัดด้วย โดยอยู่ในรูปแบบของโครงสร้างเปลือกบาง ซึ่งทำให้ได้โครงสร้างรับแรงอัดที่มีความเบา และประหยัดวัสดุก่อสร้าง

เมื่อพิจารณาแนวคิดหลักของไฟร โอทโท จะพบว่าโอทโทนั้นมีแก่นความคิดหลักเรื่องการออกแบบโครงสร้างที่ให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพของโครงสร้างด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ของรูปทรง แรงกระทำ และมวลของโครงสร้าง ตามสมการ BIC ซึ่งนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างในอุดมคติ คือการออกแบบโครงสร้างเบา และโครงสร้างเบาที่มีความเหมาะสมคือ การออกแบบโครงสร้างให้มีพฤติกรรมในการรับแรงดึงเป็นหลัก โครงสร้างเหล่านี้ตั้งอยู่บนเงื่อนไขสำคัญสองส่วน คือ แรงกระทำต่าง ๆ จากภายนอก เช่น แรงลม หิมะ เป็นต้น และความสามารถในการรับน้ำหนักของตัวโครงสร้างเองซึ่งประกอบขึ้นจากวัสดุบางอย่าง

เมื่อเข้าใจแนวคิดหลักในการออกแบบของไฟร โอทโท เช่นนี้แล้ว จะพบว่า โอทโทนั้นมีแนวคิดเรื่องประสิทธิภาพของโครงสร้าง ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์ของ มวล การรับน้ำหนัก และรูปทรงของตัวโครงสร้างนั้น การออกแบบของโอทโทจึงไม่ใช่การสร้างรูปทรง (form making) แต่เป็นกระบวนการที่เรียกว่า การค้นหารูปทรงที่เหมาะสม (form finding) ซึ่งศึกษาทดลองผ่านหุ่นจำลอง ภายภาพที่แตกต่างจากการทดลองสร้างรูปทรงเพื่อออกแบบโดยทั่วไป

สำหรับกระบวนการในการออกแบบนั้น ไฟร โอทโท ได้สร้างเงื่อนไขต่าง ๆ ขึ้น เช่น วัสดุ น้ำหนักกระทำ จากนั้นจึงทดลองสร้างหุ่นจำลองกายภาพ (physical model) ขึ้นเพื่อให้เงื่อนไขต่าง ๆ สร้างปรากฏการณ์เชิงฟิสิกส์ร่วมกับวัสดุจนได้รูปทรงที่เป็นผลลัพธ์ เมื่อพิจารณาตามหลักการที่ว่า นี้ จะพบว่าเป็นแนวคิดที่มีพื้นฐานมาจากหลักการทางวิศวกรรมเป็นหลัก เป็นการพึงพากระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อให้ได้รูปทรงเป็นผลลัพธ์ พยายามตัดความเป็นปัจเจกของผู้ออกแบบออกไป เพื่อให้มีความเป็นภววิสัย (objectivism) สูงสุด เมื่อพิจารณาในประเด็นนี้จึงอาจกล่าวได้ว่า ในเชิงนามธรรมแล้ว ไฟร โอทโทมีแนวความคิดที่คล้ายกับกลุ่มสถาปัตยกรรมสมัยใหม่ (Modern architecture) ที่พยายามลบประวัติศาสตร์และความเป็นวัฒนธรรมเฉพาะตนออกจากงานออกแบบ โดยลดทอนรายละเอียดการประดับประดาหรือรูปสัญลักษณ์ทั้งหลายออกไปจากสถาปัตยกรรม แล้วพยายามสร้างความเป็นสากลให้เกิดขึ้น นั่นทำให้สรุปได้ว่า แก่นของความคิดในการออกแบบของไฟร โอทโท คือ การออกแบบโดยมุ่งเน้นประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำของโครงสร้างตามหลักการของสมการ BIC ที่เขาได้ศึกษาและสรุปไว้เป็นหลักการทั่วไป



ภาพที่ 93 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงสร้างชนิดต่าง ๆ ตามแนวคิดของสมการ BIC

ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

ในเชิงรูปธรรมนั้น ด้วยรูปทรงที่มีความหือหาว มีเส้นโค้งและมุมแหลม การเปลี่ยนวิธีการรับน้ำหนักของโครงสร้างจากระบบโครง (skeleton frame) แบบเดิมให้มาเป็นการรับแรงดึงที่ผิว ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนสมมติฐานในการออกแบบโครงสร้าง มีการแก้ปัญหาเชิงเทคนิคในการก่อสร้างและการวิเคราะห์คำนวณโครงสร้างในวิธีใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อน ทำให้หลายคนเข้าใจว่าไฟโร โอทโท นั้นมุ่งเน้นการสร้างงานสถาปัตยกรรมแบบไฮเทค หรือเป็นการออกแบบที่มีแนวความคิดที่อิงอยู่กับเทคโนโลยีวัสดุและการก่อสร้างสมัยใหม่ ซึ่งอาจจะเป็นความเข้าใจที่คลาดเคลื่อน แน่นอนว่าพัฒนาการของวัสดุก่อสร้างและเทคโนโลยีสำหรับการก่อสร้างสมัยใหม่นั้นมีส่วนช่วยอย่างมากสำหรับการนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างรับแรงดึง แต่จากการศึกษาพบว่า ไฟโร โอทโทพยายามประยุกต์กระบวนการออกแบบที่เขาสนใจเข้ากับวัสดุที่หาง่ายสำหรับก่อสร้างงานของเขา เช่น ไม้ เต็มที่ผ้าใบ เป็นต้น โดยไม่มีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างเอง

5.2 การก่อสร้างแบบธรรมชาติ (Natural construction)

ในช่วงปลายทศวรรษที่ 1950 เริ่มมีความตื่นตัวในการประยุกต์ใช้ชีววิทยาเพื่อเป็นแรงบันดาลใจสำหรับการออกแบบ การศึกษา วิจัย ในหลากหลายศาสตร์ ในส่วนของงานวิศวกรรมนั้น มีการศึกษารูปแบบทางกายภาพของส่วนต่างๆของสิ่งมีชีวิต เพื่อใช้เป็นแรงบันดาลใจหรือกรณีศึกษาสำหรับสร้างต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือสิ่งสร้างสรรค์ที่มีความเหมาะสมกับการใช้งาน มีความประหยัดวัสดุและพลังงานที่ใช้ เช่น โนงานออกแบบด้านยานยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น

โดยรากศัพท์แล้ว คำว่าวิศวกร (engineer) มาจากภาษาลาตินว่า ingenium ซึ่งหมายถึงทักษะ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบและก่อสร้างอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน และหากย้อนไปดูคำอธิบายของนักปราชญ์ อันธิเมอุส (Anthemius) และอิซิโดโรส (Isidoros) ได้กำหนดคำในภาษากรีกว่า **αρχιτεκτονες** (architektones) ซึ่งหมายถึง หัวหน้าช่าง (master builders) ซึ่งตรงนี้เองเป็นความซ้อนเหลื่อมกันของสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม (David Muir Wood, 2012: 23-29) อย่างไรก็ดี ศาสตร์ของวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมนั้นเพิ่งแยกขาดออกจากกันเมื่อไม่กี่ศตวรรษที่ผ่านมาเอง (ibid.) (Juan Maria Songel and Frei Otto, 2010: 8)

แนวคิดเรื่องการก่อสร้างแบบธรรมชาติ เป็นสิ่งที่ปรากฏในงานดุชฎินิพนธ์ของ ไฟโร โอทโท ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1954 เป็นคำในภาษาเยอรมันว่า natürliche Tragwerk โดยโอทโทใช้เพื่ออธิบายถึงการก่อสร้างแบบธรรมชาติไว้สั้นๆ ไม่ได้ขยายความมากนัก โดยรวมเป็นการเน้นการแก้ปัญหาเชิงเทคนิคของการก่อสร้างบนพื้นฐานของการใช้วัสดุก่อสร้างในปริมาณที่น้อย และได้กล่าวสรุปเรื่องนี้ไว้สั้น ๆ ว่า การก่อสร้างแบบธรรมชาตินั้น เป็นการก่อสร้างที่ไม่ต้องออกแบบ เราแค่ช่วยประคับประคองให้เกิดกระบวนการก่อรูปเท่านั้น รูปทรงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปเองตามธรรมชาติเหมือน

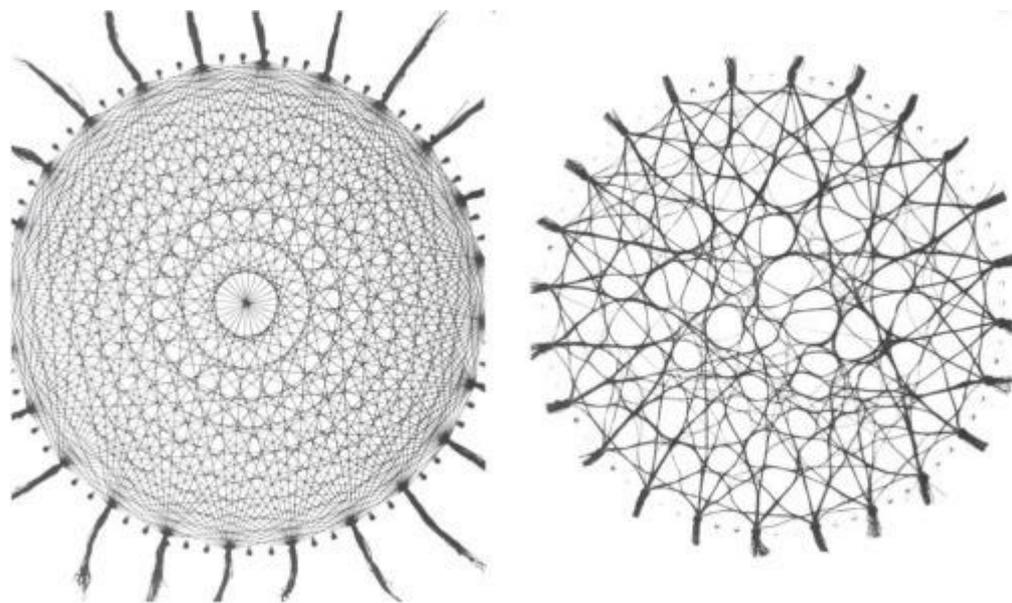
ใยแมงมุม ซึ่งเราไม่สามารถออกแบบได้ (Frei Otto, 1954: 13) จึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นการก่อตัวของแนวความคิดในระยะเริ่มต้น

ต่อมามีการใช้คำว่า Natürliche Konstruktionen ในงานวิจัยกลุ่ม SFB230 ในปี ค.ศ. 1961 เมื่อโอทโทร่วมกับนักชีววิทยา โยฮันน์ แกร์ฮาร์ด เฮลเมคเค ก่อตั้งกลุ่มวิจัยชีวะและการก่อสร้าง (Biologie und Bauen) ขึ้น มีการผสานเอานักวิชาการจากหลากหลายสาขาเข้ามาร่วมกันวิจัยเพื่อหาความเป็นไปได้ในการออกแบบโครงสร้างเบา คำว่าการก่อสร้างแบบธรรมชาติมีทิศทางที่กล่าวถึงลักษณะทางกายภาพของสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาติ ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต ซึ่งถูกใช้เป็นต้นแบบของการศึกษาในโครงการวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางโครงสร้างของไดอะตอมที่ทางทีมผู้วิจัยเห็นว่าสามารถพัฒนาไปสู่การออกแบบโครงสร้างเบาได้ อย่างไรก็ตาม การก่อรูปแบบธรรมชาติที่โอทโทสรูปร่างนั้น เป็นการก่อรูปที่ใช้วัสดุน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดการใช้งานที่ดีที่สุด แต่ไม่ใช้การลอกเลียน รูปทรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยตรง โดยโอทโทสนใจเรื่องกระบวนการในการก่อรูปทรง และเรียกกระบวนการในการก่อรูปทรงของสิ่งมีชีวิต และสิ่งไม่มีชีวิตในธรรมชาติว่า การก่อสร้างแบบธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจากการก่อรูปในสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น จากจุดเริ่มต้นนี้เองที่ทำให้ชีวะวิทยากลายเป็นส่วนสำคัญในการศึกษาและทดลองของไฟร โอทโท และสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาซึ่งเขาก่อตั้งขึ้นที่มหาวิทยาลัยซตุทการ์ทเมื่อปี ค.ศ. 1964 เรื่อยมาจนกระทั่งเขาเกษียณอายุจากการเป็นผู้อำนวยการสถาบันพร้อมกับการปรับเปลี่ยนทิศทางการวิจัยของสถาบันใหม่

สำหรับกระบวนการในการก่อรูปในสิ่งต่าง ๆ ที่โอทโทสนใจนั้น แบ่งออกได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ (Frei Otto, 1982: 105-108)

1. กลุ่มสิ่งมีชีวิต (lebende Natur)
2. กลุ่มวัตถุธรรมชาติที่ไม่มีชีวิต (nicht lebende Natur) และ
3. สิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้น (Die Objekte menschlicher Aktiväten/ Technik)

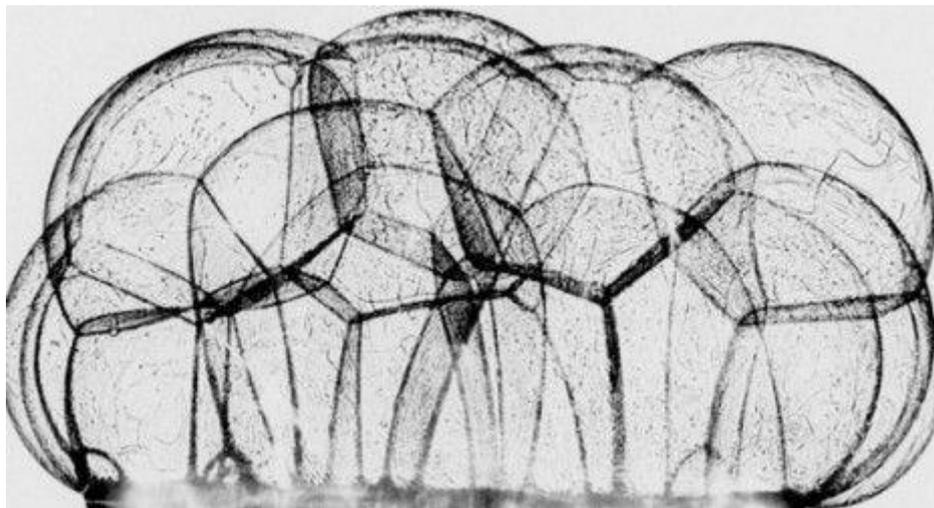
ซึ่งสิ่งที่มนุษย์สร้างขึ้นนี้ หมายถึงนวัตกรรมที่มนุษย์สร้างขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ปราศจากความเป็นส่วนบุคคล แต่อิงกฎธรรมชาติในการก่อรูป เช่น อาร์ชโค้งในงานสถาปัตยกรรม สถาปัตยกรรมโบราณ ซึ่งถูกสร้างขึ้นด้วยวัสดุและข้อจำกัดทางธรรมชาติ หรือ กงล้อ สำหรับยานพาหนะ เป็นต้น (Frei Otto, 1988: 38-77) และด้วยความเป็นปลายเปิดของการค้นหาความเป็นไปได้ที่กว้างขวางนี้เอง ทำให้งานวิจัยของไฟร โอทโท และสถาบันการออกแบบโครงสร้างเบาของเขามีความหลากหลายมาก เพื่อที่จะแสวงหาความเป็นไปได้ใหม่ ๆ ในการออกแบบโครงสร้างและสถาปัตยกรรมและโครงสร้างครอบคลุมตั้งแต่ประเด็นทางชีววิทยา วิศวกรรม สถาปัตยกรรม เมือง เป็นต้น



ภาพที่ 94 การทดลองหารูปร่างของระยะขจัด โดยใช้เส้นด้ายพันเป็นระบบหลัก จากนั้นทดลองปล่อยให้ น้ำไหลลงไปบนกลุ่มเส้นด้าย ทำให้เกิดระยะทางและรูปร่างซึ่งก่อรูปขึ้นตามการกระทำของน้ำ

ที่มา: <https://researchlm.wordpress.com/2016/04/03/frei-otto/>

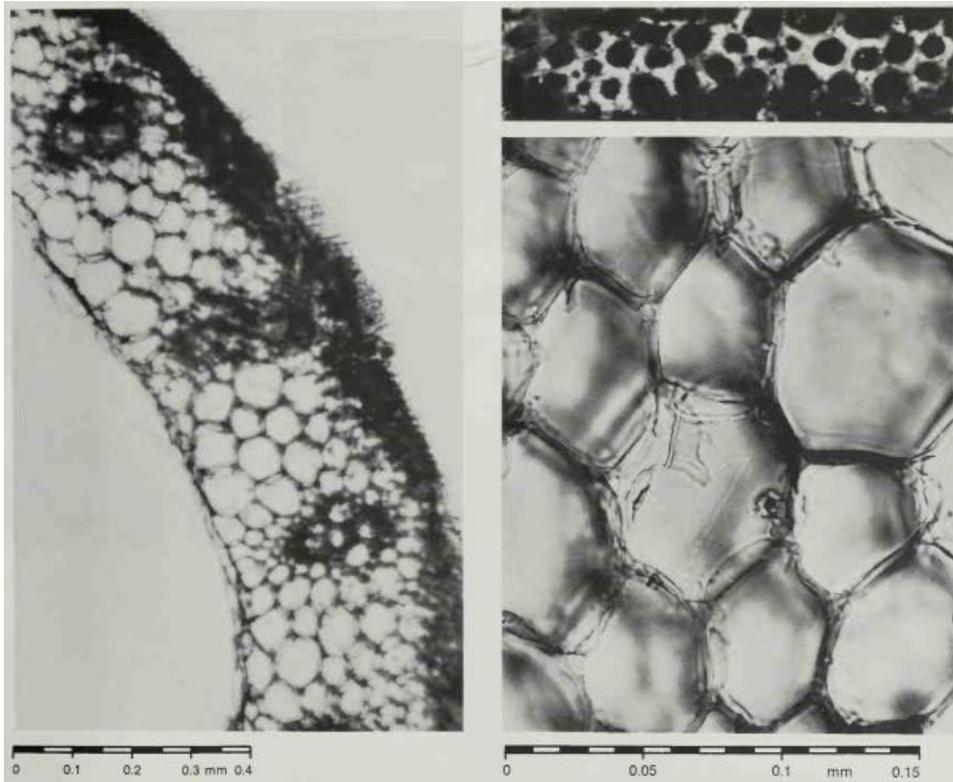
เฮลเมคเค เป็นนักชีววิทยาและศาสตราจารย์ประจำมหาวิทยาลัยอือบิงเงิน (Tübingen Universität) เป็นผู้หนึ่งที่มีส่วนผลักดันให้เกิดการประยุกต์ใช้รูปแบบทางกายภาพของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ดังกล่าว เนื่องจากเขาเป็นนักวิจัยที่มีเครื่องมือถ่ายภาพขยายของส่วนต่างๆในระดับที่เล็กมาก และเขาได้ทำการบันทึกภาพขยายของส่วนประกอบเล็กๆต่างๆในสิ่งมีชีวิตที่ตาเปล่ามองไม่เห็น ภาพเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของโครงสร้างในระดับอะตอมของสิ่งมีชีวิตมากมาย และด้วยทุนสนับสนุนด้านการศึกษาวิจัยของประเทศที่ต้องการขับเคลื่อนความรู้และการผลิตสิ่งใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง ทำให้แนวคิดเรื่องการประยุกต์ใช้ชีววิทยาถูกนำไปใช้ในโครงการวิจัยและทดลองต่างๆมากมาย



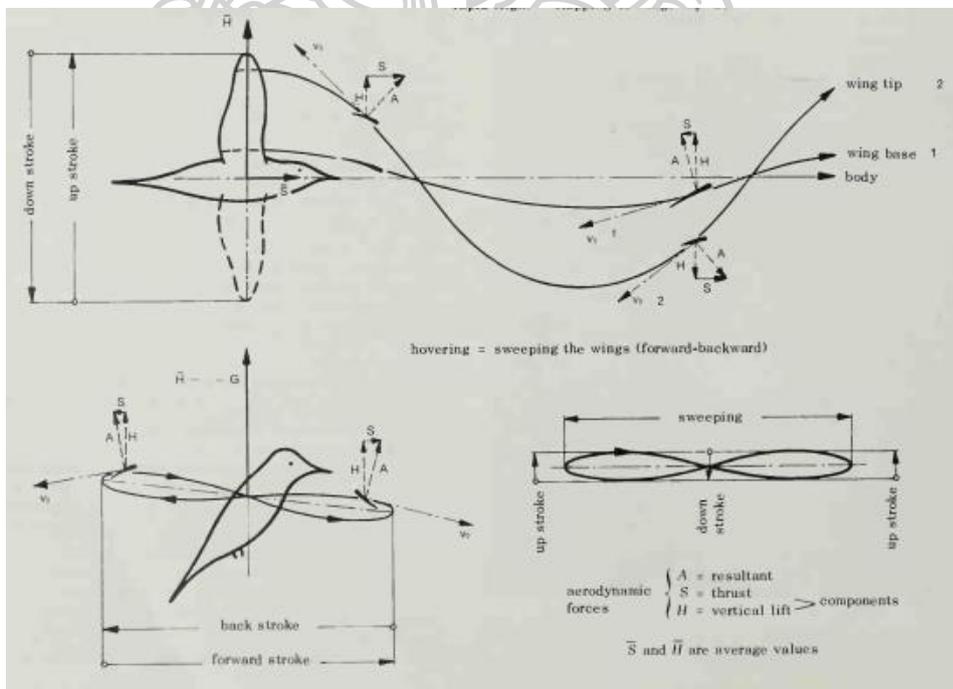
ภาพที่ 95 การทดลองกระบวนกรก่อรูปทรงของฟิล์มสบู่

ที่มา: <https://researchlm.wordpress.com/2016/04/03/frei-otto/>

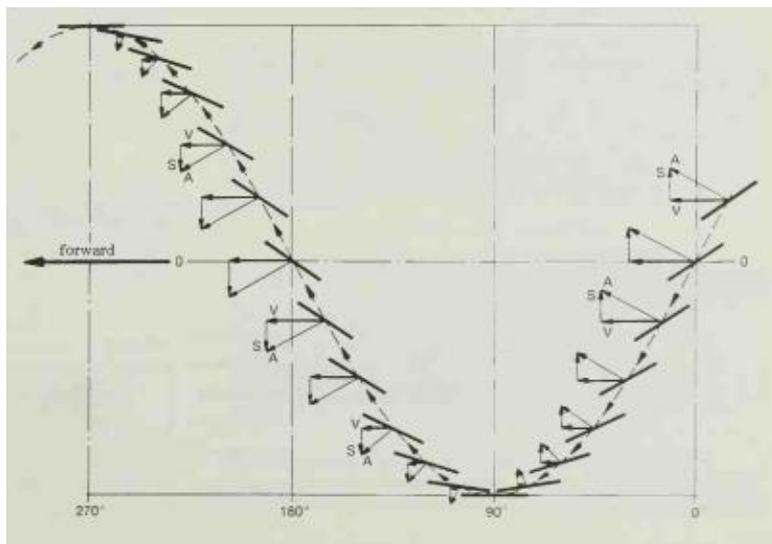
นอกจากไฟร โอทโท แล้ว ยังมีนักวิจัยชาวเยอรมันท่านอื่นอีกที่ได้นำเอาแนวคิดเรื่องชีววิทยามาประยุกต์ใช้ในสายงานของตนเอง เช่น ไฮน์ริช แฮร์เทล (Heinrich Hertel) วิศวกรโครงสร้าง ซึ่งต่อมาหันมาสนใจด้านการออกแบบโครงสร้างของอากาศยาน และได้พัฒนาการออกแบบโดยคำนึงถึงหลักการทางโครงสร้างที่มีความเบา มีความสมเหตุสมผลของระบบโครงสร้าง มีการใช้วัสดุที่น้อย เพื่อใช้เป็นแนวทางการออกแบบโครงสร้างส่วนต่างๆของอากาศยาน โดยได้ตีพิมพ์หนังสือเรื่อง โครงสร้าง รูปทรง การเคลื่อนไหว (Struktur, Form, Bewegung) โดยในส่วนของบทนำนั้น แฮร์เทล แสดงทัศนะเรื่องการใส่ใจในการศึกษาเพื่อผสมผสานความรู้ของชีววิทยาและวิศวกรรมศาสตร์เข้าด้วยกัน ความหวังใต้อุปุหาการทำลายสภาวะแวดล้อมของโลก และเชื่อว่าการบูรณาการชีววิทยากับวิศวกรรมเข้าด้วยกันนั้น จะนำไปสู่หนทางใหม่ในการสร้างสรรค์งานออกแบบที่เป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม (Heinrich Hertel, 1963: 2) อย่างไรก็ตาม ในเรื่องของโครงสร้างตามความเห็นของแฮร์เทลนั้น สนใจโครงสร้างเบาในลักษณะของโครงสร้างแบบแผ่นประกบ (sandwich shell) ซึ่งเกิดจากแผ่นผิวบางๆในของส่วนของสิ่งมีชีวิต ที่ประกบกันโดยมีแกนเล็กๆคั่นเพื่อแบ่งแผ่นผิวประกบนั้นออกเป็นส่วนๆ ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะช่วยเสริมแรงให้แผ่นผิวบางๆนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้น ในขณะที่มีน้ำหนักเบา (ibid., 6-12)



ภาพที่ 96 ภาพขยายแสดงโครงสร้างสิ่งมีชีวิต โดยแฮร์เทล
ที่มา: Heinrich Hertel, 1963: 7



ภาพที่ 97 การศึกษาการกระพือปีกของนกเพื่อพัฒนางานวิศวกรรมอากาศยาน
ที่มา: Heinrich Hertel, 1963: 46



ภาพที่ 98 การศึกษาการสับทิศทางของปลาเพื่อทำให้เกิดแรงและการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้งงอในทิศทางด้านหน้า

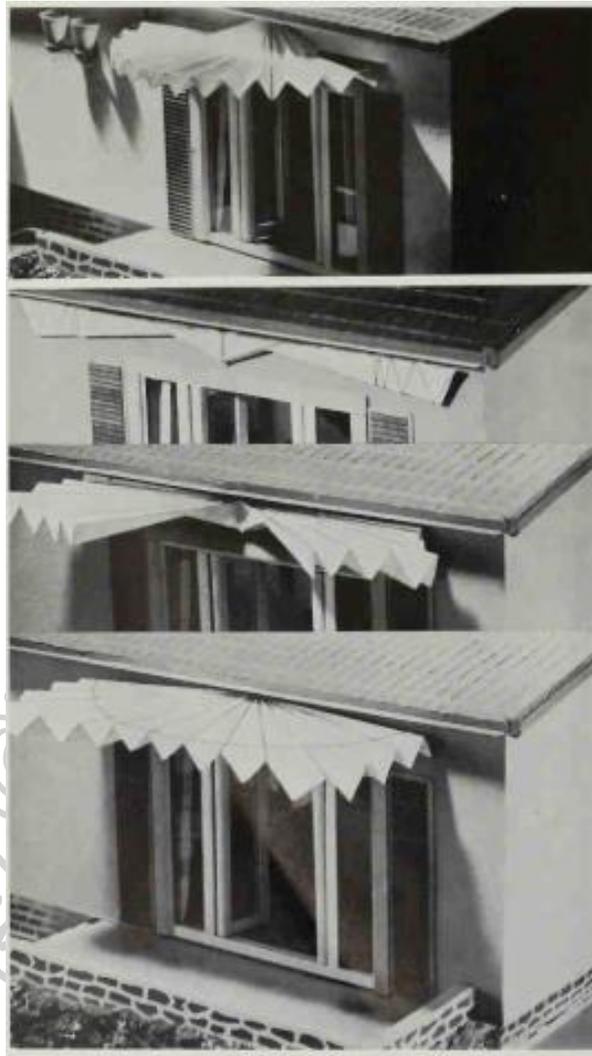
ที่มา: Heinrich Hertel, 1963: 57



ภาพที่ 99 แฮร์เทล ขณะทำการทดลองเพื่อพัฒนางานวิศวกรรมอากาศยาน ณ มหาวิทยาลัยเทคนิคเบอร์ลิน

ที่มา: <https://www.alamy.com/prof-dr-ing-heinrich-hertel-during-stream-test-at-the-tu-berlin-technical-university-of-berlin-image336631024.html>

นอกจากนี้ แอร์เทลยังได้ศึกษาโครงสร้างของปีกแมลงชนิดต่างๆ การเคลื่อนที่โดยการขยับปีกในรูปแบบต่างๆ ซึ่งเขาเองได้นำเอาลักษณะของการขยับคลี่และเก็บปีกของแมลงมาเสนอแนะเป็นการออกแบบแผ่นหลังคาที่สามารถขยับเปิดปิดได้ด้วย



ภาพที่ 100 การออกแบบหลังคาที่สามารถเปิด-ปิดได้

ที่มา: Heinrich Hertel, 1963: 86

แม้ว่าเนื้อหาภายในหนังสือจะแสดงให้เห็นความสนใจของนกและปลา ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการเคลื่อนไหว ต่างจากไฟร โอทโท ซึ่งมักศึกษาจากองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตในระดับที่เล็กกว่า และมักมีสภาวะที่หยุดนิ่ง แต่ก็แสดงให้เห็นกระแสของแนวคิดด้านการบูรณาการศาสตร์ด้านชีววิทยาเข้ากับงานวิศวกรรมของชาวเยอรมันในช่วงเวลานั้น

สำหรับโอทโทเสนอให้ใส่ใจกับธรรมชาติ โดยเมื่อพิจารณากระบวนการคิดสรรของธรรมชาติ เราจะพบว่าสิ่งมีชีวิตมีความสามารถในการพัฒนาตัวเอง เพื่อให้แข็งแรง อยู่รอดใน

สภาพแวดล้อม ทั้งสัตว์และพืช ดังนั้นต้องมีการปรับตัวให้มีน้ำหนักน้อย และมีความแข็งแรงมาก เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนอันเกิดจากความสัมพันธ์กันระหว่างมวล และพลังงานที่ต้องใช้ โอทโทจึงประยุกต์หลักการนี้เป็นหลักการออกแบบโครงสร้างเบา (Prinzip Leichtbau) ของเขา

5.3 Gestalt

Gestalt finden ถูกแปลเป็นภาษาอังกฤษว่า form finding ตามหน้าปกหนังสือ ในคราวที่ตีพิมพ์เพื่อประกอบการจัดแสดงผลงานของไฟร โอทโท เมื่อปี ค.ศ.1995 ในการรับรางวัล Deutscher Werkbund prize อย่างไรก็ตาม เมื่อได้ศึกษาผลงานของไฟร โอทโท ทั้งจากงานเขียน และการวิเคราะห์จากผลงานการออกแบบ ผู้ศึกษาพบว่า Gestalt ในที่นี้ไม่ได้หมายถึง รูปทรง (form) โดยทั่วไป หากแต่ต้องมีนัยยะที่ลึกซึ้ง ก็นความหมายรวมถึงกระบวนการในการก่อรูปซึ่งเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ของแรงกระทำต่อวัสดุโครงสร้าง จนกระทั่งแรงกระทำต่อโครงสร้างนั้นอยู่ในสถานะสมดุล แล้วได้ผลลัพธ์เป็นรูปทรง ซึ่งแสดงออกถึงความจริงของกระบวนการทั้งหมด เป็นผลลัพธ์ที่สัมพันธ์กับตรรกะ และไร้ซึ่งสิ่งประดับตกแต่งที่ไม่เกี่ยวข้อง

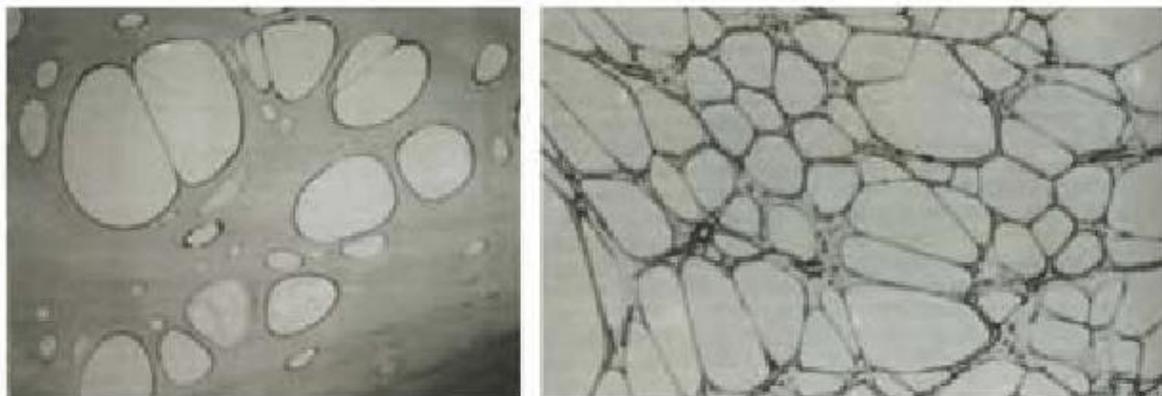
โอทโท กล่าวถึง รูปทรง หรือ Gestalt โดยนัยยะความหมายถึงลักษณะขององค์รวมของสิ่งหนึ่ง และใช้คำว่า form แยกจากคำว่า gestalt อย่างชัดเจน สำหรับคำว่า form นั้น โอทโทหมายถึงองค์ประกอบหนึ่งหน่วยในองค์รวม เมื่อองค์ประกอบย่อย ๆ เหล่านี้ประกอบรวมกัน จึงจะเป็น Gestalt ซึ่งการประกอบรวมกันจนเป็นองค์รวมนี้ โอทโทมิได้หมายถึงการจัดองค์ประกอบ (composition) แต่เป็นกระบวนการ (process) ในการก่อรูปด้วยตัวเอง (self-organization, self-formation) ของระบบสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ ซึ่งโอทโทเชื่อว่ารูปทรงของทุกสิ่ง จะสะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการในการก่อรูปของตนเอง (Frei Otto, 1982) (Frei Otto, 1988: 5-9) เช่น การเจริญเติบโตของเซลล์สิ่งมีชีวิต จากหนึ่งเซลล์แยกเป็นทวีคูณ เป็นปรากฏการณ์ในการก่อรูปของตนเองอันเนื่องมาจากปัจจัยต่าง ๆ จนได้รูปทรงที่อยู่ในสถานะที่เหมาะสมเป็นผลลัพธ์ ดังนั้น Gestalt จึงไม่สามารถอธิบายด้วยรูปทรงเดี่ยวใด ๆ ได้ แต่ต้องถูกพิจารณาในรูปแบบของระบบแบบองค์รวม

ในที่นี้ โอทโทเริ่มศึกษาจากรูปทรง (gestalt) ที่เป็นวัตถุจริงที่จับต้องได้ มีเนื้อของวัสดุจริง ไม่ใช่รูปทรงทางความคิด สำหรับการศึกษาเพื่อเข้าใจ gestalt นั้น โอทโทมีข้อเสนอ 3 ประการ คือ (Frei Otto, 1988: 76-77)

1. การยอมรับรูปทรงต่างๆตามความเป็นจริง (die Wahrheit) ซึ่งโอทโทเสนอว่าให้ทำอย่างไม่มีอคติหรือมีภาพในใจไว้ล่วงหน้า ตัดวางความรู้สึกเฉพาะตนออกจากการศึกษา
2. การสร้างความรู้ความเข้าใจที่ถูกต้อง (die Richtigkeit) โดยต้องอาศัยความถูกต้องเป็นจริงในเชิงวิทยาศาสตร์ จะต้องมีการพิสูจน์เพื่อให้เป็นที่ยอมรับได้โดยคนทั่วไป

3. การนำเสนอความคิดใหม่ (der Wunch) ในการออกแบบ คือความพยายามที่จะค้นหา รูปทรงที่แท้จริง เป็นรูปทรงในอุดมคติ เพื่อนำไปสู่การสร้างสังคมในอุดมคติต่อไป

อย่างไรก็ดี การก่อรูปแบบธรรมชาติที่โอทโทเสนอนั้น เป็นการก่อรูปที่ใช้วัสดุน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของโครงสร้างที่ดีที่สุด แต่ไม่ใช่การลอกเลียนรูปทรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ หรือไม่ใช่การอยู่อาศัยร่วมกับธรรมชาติโดยตรง เพราะมนุษย์ไม่สามารถมีชีวิตอยู่ได้หากต้องรับ แสงแดดโดยตรง เราไม่สามารถต้านทานแรงลมได้ หรือกระทั่งความร้อนใต้ดินที่เกินควรก็ทำให้เรา เสียชีวิตได้ การศึกษาเรื่องธรรมชาตินั้น ไม่ใช่การศึกษาวัตถุใดโดยเฉพาะ เพราะในธรรมชาตินั้นมี ความเป็นไปได้ของรูปทรงต่าง ๆ มากมายนับไม่ถ้วน ความซับซ้อนเหล่านี้คือ องค์รวมแห่งธรรมชาติ (Ganzheiten der Natur) ซึ่งจะทำให้เราเข้าใจภาพรวมของสรรพชีวิต (Biotope) ทั้งหลาย (ibid.) ในฐานะที่มนุษย์เองก็เป็นส่วนหนึ่งของธรรมชาติที่เกิดขึ้นในจักรวาลนี้ ดังนั้น มนุษย์จึงควรศึกษาและ เข้าใจปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในธรรมชาติ และในฐานะนักออกแบบ ปรากฏการณ์ที่ว่าคือ การก่อรูปด้วย ตนเอง ของสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาตินั่นเอง



ภาพที่ 101 การศึกษากระบวนการเปลี่ยนรูปจากระนาบไปสู่เส้น และจากเส้นสู่ระนาบ
ที่มา: Lars Spuybroek, 2005: 354

นอกจากนี้ จากการศึกษาของโอทโทและทีมงานที่สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา ทำให้พวกเขาสามารถสร้างแผนภาพขนาดใหญ่แสดงภาพรวมของโครงสร้างเบาตามแนวคิดตามสมการ BIC ขึ้นมาได้ (ภาพที่ 5.1) ซึ่งหากผู้ออกแบบทั้งสถาปนิกและวิศวกรต้องการออกแบบโครงสร้างที่มี ประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละช่วงพาดสามารถใช้แผนภาพนี้เป็นแนวทางในการพิจารณาได้

5.4 มินิมัล (minimal)

ไฟโร โอทโท เสนอความคิดเรื่องความน้อย หรือมินิมัล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของรูปทรง ต่าง ๆ ในธรรมชาติ ประกอบด้วย ระยะขจัด (minimal path), ระนาบหรือพื้นผิวขจัด (minimal

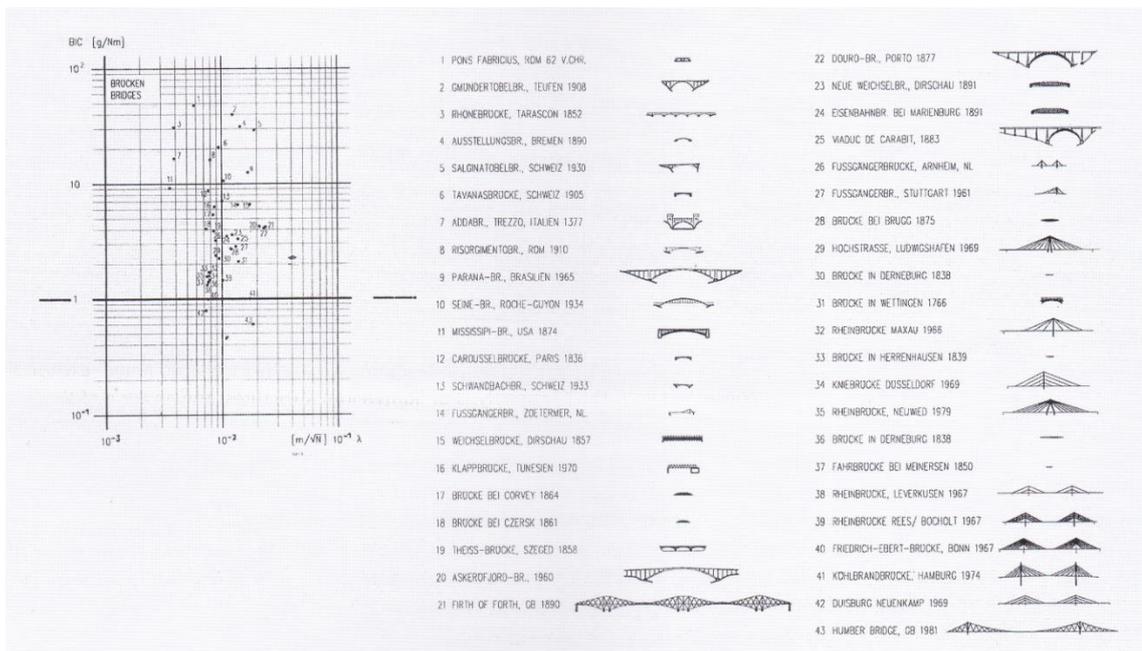
surface), และสถาปัตยกรรมที่น้อย หรือสถาปัตยกรรมมินิมัล (minimal architecture) ซึ่งก็คืออีกความหมายหนึ่งของโครงสร้างเบานั่นเอง

โอทโท ได้เสนอความคิดเรื่องน้อยแต่มากในการออกแบบ โดยอธิบายถึงการใช้วัสดุที่น้อยปรับเปลี่ยนได้ ใช้พลังงานน้อย เพื่อตอบสนองการใช้สอยของมนุษย์ ผสานกลมกลืนกับผิวโลก น้ำ และอากาศ การสร้างโดยคำนึงถึงการอยู่ร่วมกับธรรมชาติจะต้องถูกคิดตั้งแต่เส้นแรกที่เรลาก เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการสร้างอาคารเพื่อรองรับกิจกรรมของมนุษย์กับโลก (Frei Otto, 2017: 8-11)

ในการออกแบบโครงสร้างเบาของโอทโทนั้น ให้ความสำคัญกับมวลของวัสดุก่อสร้าง และความสามารถในการต้านทานแรงกระทำในโครงสร้าง ซึ่งโอทโทเห็นว่า โครงสร้างรับแรงดึงนั้นเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โครงสร้างที่ใช้มวลวัสดุที่น้อยและมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงนี้เองที่โอทโทเรียกว่า สถาปัตยกรรมที่น้อย (minimal architecture)

สถาปัตยกรรมที่น้อยตามนิยามของโอทโทนี้ ถูกทดลองและพิสูจน์ด้วยเครื่องมือทดลองเพื่อหาระยะขจัดที่สั้นที่สุด (minimal path) และระนาบหรือพื้นผิวขจัด (ระนาบหรือพื้นผิวขจัด) ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้กรอบของโครงสร้าง จากการทดลองหาพื้นผิวฟิล์มสบู่ ซึ่งแนวคิดเหล่านี้สอดคล้องกับแนวคิดเรื่องการคำนึงถึงการลดการใช้วัสดุก่อสร้างตามแนวคิดของ ลาฟไฟเล่ ซึ่งโอทโทกล่าวถึงในหนังสือของเขาด้วย (Frei Otto, 1982: 82)

ระยะขจัด และพื้นผิวขจัดนั้น ถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ทดลอง โดยโอทโทจะสร้างรูปทรงจากความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยภายนอกกับตัวผิวของฟิล์มสบู่ กล่าวคือ ด้วยขอบเขตจำกัดของโครงสร้างเส้นลวด หรือโครงของที่กำหนด เมื่อจุ่มลงในน้ำสบู่แล้วยกขึ้น ตัวฟิล์มสบู่จะก่อรูปพื้นผิวด้วยตนเองในระยะเวลาที่สั้นที่สุดและอยู่ในภาวะสมดุล รูปทรงนี้เองที่จะถูกพัฒนาต่อในเชิงเทคนิคการก่อสร้างเป็นสถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างมินิมัล กล่าวได้ว่า โครงสร้างมินิมัล หรือโครงสร้างเบา คือ โครงสร้างที่สามารถรับแรงกระทำได้มากที่สุด ในขณะที่ใช้มวลวัสดุที่น้อยที่สุด ซึ่งโอทโทเห็นว่านี่เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 102 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโครงสร้างสะพานตามระยะช่วงพาดต่าง ๆ
ที่มา: Bildarchiv des Instituts für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

5.5 การค้นหารูปทรง (gestalt finden)

โอทโทศึกษาเรื่องประวัติศาสตร์ของการก่อรูปทรงต่าง ๆ ในธรรมชาติ รูปทรงเชิงเทคนิคที่มนุษย์สร้างขึ้น และสถาปัตยกรรม ครอบคลุมประเด็นเรื่องวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ ปรัชญา และศิลปะ สำหรับการค้นหารูปทรงนี้ เป็นวิธีการในการออกแบบของไฟร โอทโท ซึ่งใช้เพื่อออกแบบโครงสร้างเบาชนิดต่าง ๆ เช่น โครงสร้างผ้าใบ โครงสร้างตาข่ายเคเบิล เป็นการค้นหากฎธรรมชาติ (universal natural law) ในการก่อรูปทรง ที่เทียบเคียงได้กับแนวคิดเรื่องกระบวนการคัดสรรโดยธรรมชาติของชาร์ลส์ ดาร์วิน (Charles Darwin) (Philip Drew, 1976: 13-21) เป็นการทดลองสร้างรูปทรงจากกระบวนการสร้างระบบเฉพาะซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ เป็นปัจจัยให้เกิดการก่อรูปทรง



ภาพที่ 103 หุ่นจำลองกายภาพ (physical model) ซึ่งโอทโทใช้เป็นเครื่องมือในการทดลองกระบวนการก่อรูปทรงของเขา ถูกจัดแสดง ณ มหาวิทยาลัย คาร์ลสรูห์ เมื่อปี ค.ศ.2017
ที่มา: <https://www.designboom.com/architecture/frei-otto-thinking-in-models-exhibition-karlsruhe-germany-far-frohn-and-rojas-12-14-2016/>

ด้วยความพยายามศึกษารูปแบบของโครงสร้างชนิดต่าง ๆ เพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมนั้น เป็นการศึกษาที่ไม่เคยมีสถาปนิกหรือวิศวกรเคยทำมาก่อน โอทโทจึงต้องศึกษาจากรูปแบบของโครงสร้างทั้งหมดที่มีในโลก ซึ่งรวมถึงโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ วัตถุประสงค์ตั้งแต่ระดับอะตอมถูกนำมาพิจารณาเพื่อสร้างความเข้าใจภาพรวมของรูปทรงทั้งหมด เป็นวิธีการศึกษาที่มีความคิดแตกต่างจากการออกแบบที่เคยมีมาทั้งหมด กล่าวคือ โอทโทมีสมมติฐานที่จะแสวงหารูปทรงที่มีมวลน้อยที่สุด แต่สามารถรับแรงกระทำได้มากที่สุดตามวัตถุประสงค์ของโครงสร้างในรูปทรงนั้น ๆ นำมาซึ่งสมมติฐานของสมการ BIC ซึ่งกล่าวถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างอันเกิดจากความสัมพันธ์ของมวลวัสดุกับความสามารถในการรับแรงกระทำ ต่อมาโอทโทได้ขยายการศึกษาให้กว้างขวางมากยิ่งขึ้นไปถึงเรื่องของพลังงานที่ถูกใช้ในการก่อรูปโครงสร้าง การขนส่ง เป็นต้น การศึกษานี้จึงเป็นแนวคิดใหม่ที่ทั้งสถาปนิกและวิศวกรไม่เคยก้าวข้ามไปถึง เนื่องจากเคยชินกับวิธีการออกแบบที่ต้องมีการกำหนดรูปทรงโดยผู้ออกแบบก่อน จากนั้นจึงมีการวิเคราะห์แรงกระทำ และสมดุลของโครงสร้างโดยวิศวกร เพื่อจะกำหนดรายละเอียดในการก่อสร้าง

นอกจากนี้ ระบบการก่อรูปตามความหมายของโอทโทนั้น ไม่ได้เป็นการสร้างระบบเดี่ยว เบ็ดเสร็จ แต่เป็นการสร้างระบบเชิงซ้อนที่มีการเกาะเกี่ยวกันของระบบย่อยหลาย ๆ ระบบ จนเกิดการก่อรูปทรง ซึ่งสะท้อนให้เห็นผ่านการจัดกลุ่ม (classification) ระบบของโครงสร้าง ซึ่งโอทโทเสนอว่าการเกิดรูปทรงจะเกิดจากกระบวนการของการถ่ายแรงในโครงสร้าง สำหรับเกณฑ์ในการจัดแบ่งประเภทของโครงสร้างนั้น ประกอบด้วย มิติ แรงกระทำ และสถานะ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

มิติ (dimension) ประกอบด้วยโครงสร้างหนึ่งมิติ (linear) เช่น เคเบิล เสา คาน สองมิติ (surface) เช่น เปลือก เมมเบรน และสามมิติ (space) เช่น space frame

แรงกระทำ (loading) คือทิศทางที่โครงสร้างถูกแรงกระทำ เช่นเดียวกับมิติ จะมีแรงเดียว สองแรง หรือสามแรง

สถานะ (state) ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของโครงสร้าง วัสดุ เช่น สถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ หรืออาจจะไม่ปรากฏสถานะเลย เช่น พลังงาน

จากการจัดกลุ่มนี้ จะเห็นได้ว่า ในกรณีโครงสร้างเคเบิลรับแรงดึง คือโครงสร้างมิติเดียว ที่รับแรงกระทำแบบทางเดียว (uniaxial) และมีสถานะเป็นของแข็ง เป็นต้น ด้วยวิธีการจัดแบ่งแบบนี้ ทำให้โอทโทสามารถสร้างทฤษฎีโครงสร้างที่น้อย (minimal theory of structures) ของตัวเอง ขึ้นมาได้ ต่างจากอดีตซึ่งแบ่งรูปแบบการรับน้ำหนักตามชนิดของแรงกระทำ แรงดึง แรงอัด และ โมเมนต์ (Philip Drew, 1976: 13-21) ซึ่งจะทำให้มีความยุ่งยากกว่า เนื่องจากโครงสร้างบางแบบ เป็นโครงสร้างสองมิติเหมือนกัน แต่รับแรงต่างประเภทกัน เป็นต้น

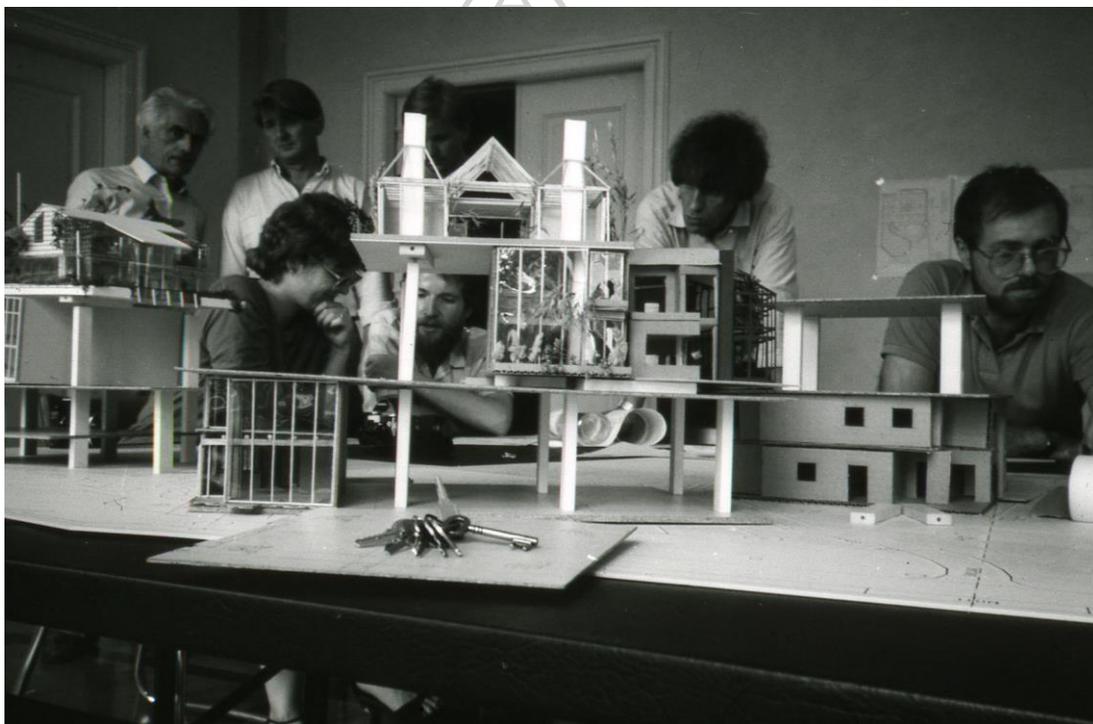
5.6 สุนทรียภาพ (Aesthetics)

ในปี ค.ศ.1954 ไพร โอทโท ได้พัฒนาแนวความคิดการออกแบบหลังคารับแรงดึง โดยชี้ประเด็น การรับแรงดึง โดยเปลี่ยนพฤติกรรมของเส้นด้าย เชือกและผ้าใบให้กลายเป็นระนาบรับน้ำหนัก เป็นฐานของแนวคิดใหม่ในการออกแบบโครงสร้างเบา และโอทโทยังเสนอว่า โครงสร้างใหม่นี้คือ สถาปัตยกรรม และเชื่อมั่นว่ามันจะกลายเป็นเมืองในอนาคต

โอทโท ได้เสนอความคิดสำหรับการออกแบบที่เรียกว่าโครงสร้างแบบธรรมชาติ (natürliche Tragwerk) โดยให้ความสำคัญกับความคิดสร้างสรรค์ทางการออกแบบสถาปัตยกรรม เป็นหลัก ส่วนการแก้ปัญหาเชิงเทคนิคและการคำนวณทางวิศวกรรมนั้นนั้นเป็นสิ่งจำเป็นที่ตามมาทีหลังโดยไม่ต้องกังวลถึงความสมบูรณ์พร้อมของการวิเคราะห์คำนวณในตอนแรก วิธีการออกแบบ ง่ายๆเช่นนี้เองที่เป็นเครื่องมือที่จะนำไปสู่โครงสร้างธรรมชาติ ซึ่งมีการใช้วัสดุก่อสร้างที่น้อยที่สุด (Materielosenaktes) เป็นแนวคิดที่สอดคล้องกับโครงสร้างรับแรงดึง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถรับ น้ำหนักได้ดีบนเงื่อนไขของวัสดุที่น้อย กระบวนการทดลองและออกแบบของเขานำไปสู่ผลลัพธ์ที่เป็น

รูปทรงอิสระหลายรูปแบบ ซึ่งต่อมากะบวนการนี้ถูกเรียกว่า “การค้นหารูปทรง” (form finding) หรือ Formfindung ในภาษาเยอรมัน

เมื่อพิจารณารูปทรงที่เป็นผลจากการทดลองและสร้างขึ้นโดยฟรี โอทโท ในฐานะงานออกแบบสถาปัตยกรรม ประเด็นในเรื่องความงาม (aesthetics) จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ ในส่วนต่อไปนี้ ผู้ศึกษาได้ศึกษาและวิเคราะห์ประเด็นความคิดเรื่องความงามตามทัศนะของฟรี โอทโท ซึ่งเกิดจากการศึกษางานประพันธ์ที่ถูกทำขึ้นโดยโอทโทเอง ซึ่งมีการกล่าวถึงประเด็นปลีกย่อยต่างๆเกี่ยวกับความคิดเห็น หรือข้อเสนอทางด้านความงามไว้ แล้วนำมาประมวลกันเป็นข้อสรุปในประเด็นดังกล่าว



ภาพที่ 104 ฟรี โอทโท (ยืน ซ้ายสุด) ขณะทดลองออกแบบอาคาร Ökohaas ร่วมกับนักศึกษา ในปี ค.ศ.1987 ซึ่งมุ่งนำเสนออาคารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ด้วยการใช่วัสดุที่น้อยและเกิดประโยชน์สูงสุด

ที่มา: <http://www.the-offbeats.com/articles/building-together-the-okohaas-frei-otto-collective-improvisation/>

ในบทความชื่อ จินตนาการกับสถาปัตยกรรม (Phantasie und Architektur) ซึ่งถูกตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1962 โอทโท พูดถึงจินตนาการ (Phantasie) ว่าเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบสถาปัตยกรรม อย่างไรก็ตาม สำหรับการออกแบบสถาปัตยกรรมต้องไม่ใช่จินตนาการแบบฟุ้งเกินจริง

หรือเกิดจากความต้องการส่วนตัวแต่เพียงอย่างเดียว แต่ควรมีประเด็นเรื่องการสะท้อนยุคสมัยด้วย ซึ่งการใช้จินตนาการแบบอิสระจะไม่สนใจประเด็นนี้ (Frei Otto, 1984: 65-69)

โอทโทยังตั้งคำถามกับคุณค่าของศิลปะและงานออกแบบ ว่าปัจจุบันนี้มีคุณค่ามากขึ้น หรือดีขึ้นกว่าอดีตหรือไม่ ในขณะที่สังคมมีพัฒนาการขึ้นตามยุคสมัย แต่คุณค่ายังถูกผูกติดกับแนวคิดรูปแบบแบบดั้งเดิมโอทโทเสนอว่าการออกแบบสถาปัตยกรรมควรเชื่อมโยงสัมพันธ์กับจิตวิญญาณของยุคสมัย รวมถึงเปรียบสถาปัตยกรรมว่าควรเป็นเหมือนบทกวีที่บันทึกบอกเล่าเรื่องราวของยุคสมัย

โอทโทอธิบายถึงจินตนาการที่ช่วยขับเคลื่อนการพัฒนา เรียกว่า จินตนาการพัฒนาการ (evolutionäre Phantasie) (ibid.: 66) เพื่อผลักดันไปสู่การออกแบบเพื่ออนาคตที่ดีขึ้นกว่าเดิม สู้ความเป็นไปได้ใหม่ๆ เพื่อบรรลุคุณค่าใหม่ที่สูงส่งเช่น ยูโทเปีย เป็นต้น ประเด็นเรื่องความสนใจเรื่องพัฒนาการของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมนี้เอง อาจเทียบเคียงได้กับแนวคิดหลักโดยภาพรวมของชาติ ซึ่งประเทศเยอรมนีเองนั้น ให้ความสำคัญกับนโยบายในการพัฒนาประเทศผ่านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั่วโลกถึงขีดความสามารถด้านนี้

อย่างไรก็ดี ต่อประเด็นการพึ่งพิงอุตสาหกรรมการผลิตซึ่งอาจส่งผลต่อความคิดสร้างสรรค์นั้น โอทโทเชื่อว่าการใช้เครื่องมือ เครื่องจักร ไม่ใช่ต้นเหตุของการสูญเสียจินตนาการ แต่เป็นเพราะผู้ใช้ที่ใช้เครื่องมือโดยขาดการคิดพิจารณา และด้วย จินตนาการพัฒนาการนี้เองที่โอทโทผูกโยงเข้ากับการออกแบบสถาปัตยกรรมในอนาคตที่ส่งผลด้านบวกกับโลกด้วยการใช้วัสดุและพลังงานที่น้อย (ibid.: 68)

ไพโร โอทโท มีโอกาสทำโครงการวิจัย SFB230 ซึ่งเป็นการบูรณาการความรู้จากผู้เชี่ยวชาญหลายศาสตร์เข้าด้วยกัน และได้เขียนบทความเรื่อง ความหลงใหลและความท้าทาย: ความไม่ชัดเจนในโครงการวิจัยขนาดใหญ่ (Fazination und Probleme: Unwägbarkeiten großer Forschungsvorhaben)

ในโครงการนี้ โอทโทและทีมผู้วิจัยพยายามมองหาคุณภาพแบบใหม่ (besondere Qualität) ของงานออกแบบผ่านสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ ด้วยการค้นหาเทคนิคในการก่อสร้างแบบใหม่ที่มีน้ำหนักเบา และเชื่อว่าชีววิทยาจะสามารถนำเสนอสุนทรียะแบบใหม่ได้ (Frei Otto, 1984: 133-137)

ในปี ค.ศ.1977 เมื่อมีการประกวดออกแบบและก่อสร้างอาคารพิพิธภัณฑสถานศิลปะเมืองชตุทท์การ์ทนั้น โอทโทได้แสดงทัศนะต่อผลงานการออกแบบซึ่งมีประเด็นเรื่องความงามไว้อย่างชัดเจน โดยโอทโทได้เขียนวิจารณ์งานออกแบบพิพิธภัณฑสถานศิลปะชตุทท์การ์ทลงในหนังสือพิมพ์ท้องถิ่นของเมือง ผ่านบทความชื่อ บุทัลลิสม์ในชตุทท์การ์ท? ข้อวิพากษ์ของไพโร โอทโท และ แบร์โธลด์ บวร์กฮาร์ดท ต่อการประกวดออกแบบหอศิลปะเมืองชตุทท์การ์ท (Brutalismus in Stuttgart?, Eine kritische Stellungnahme von Frei Otto und Berthold Burkhardt zum

Architektenwettbewerb Stuttgarter Staatsgalerie) โอทโทแสดงทรรศนะต่องานออกแบบโดย เจมส์ สเตอร์ลิงก์ สถาปนิกชาวอังกฤษ ซึ่งเป็นผู้ชนะการประกวดออกแบบงานต่อเติมหอศิลปะแห่ง เมืองชตุทท์การ์ท โดยกล่าววิจารณ์ผลงานออกแบบของสเตอร์ลิงก์ว่า เป็นงานออกแบบที่หยาบกร้าน (Brutalism) เป็นงานตามกระแสแฟชั่น มีราคาแพง เป็นงานสถาปัตยกรรมที่มาจากแนวคิดมือสอง เป็นอาคารที่ผสมรวมเอาวัสดุหลากหลายชนิด กับมีหลังคาแบนปิดไว้ด้านบน (Frei Otto, 1984: 153-153)



ภาพที่ 105 โครงการต่อเติมพิพิธภัณฑศิลป์ชตุทท์การ์ท ออกแบบโดยเจมส์ สเตอร์ลิงก์
ที่มา: <https://commons.wikimedia.org/>

โอทโทกล่าวถึงการออกแบบของสเตอร์ลิงก์ว่าทำราวกับสถาปัตยกรรมเป็นเพียงฉากของละคร โดยไม่ได้คิดถึงประเด็นทางสังคม ที่ซึ่งสถาปัตยกรรมนี้ตั้งอยู่ เป็นงานประเภทที่สถาปนิก สร้างรูปทรง (Gestalt-machen) ขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่น่ายินดี พร้อมทั้งเสนอความเห็นเรื่องการออกแบบที่ใส่ใจกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยรอบตัวสถาปัตยกรรม เมื่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์ สัตว์ พืช สถาปัตยกรรมหลอมรวมเป็นหนึ่งเดียวกัน นั่นจึงจะเรียกได้ว่ามีความงาม และสถาปัตยกรรมที่ดีควรมองไปถึงความต้องการของคนในอนาคต (ibid.) จากการวิจารณ์ผลงานออกแบบดังได้กล่าวมานี้ เห็นได้ชัดเจนว่า ไพโร โอทโท ไม่ให้ความสำคัญกับรูปทรง(สถาปัตยกรรม)ที่ถูกคิดหรือกำหนดขึ้นโดยสถาปนิก แม้ว่าสถาปนิกผู้ออกแบบจะมีการกล่าวอ้างถึงที่มาของแนวความคิดที่เกี่ยวข้องกับชุมชนก็ตาม

ในบทความชื่อ สุนทรียะ: ความคิดเรื่องสุนทรียะของวัตถุ (Das Ästhetische: Gedanken über das Ästhetische bei materiellen Objekten) (Frei Otto, 1984: 196-217) โอทโท เสนอว่า สถาปนิกต้องการสร้างงานที่มีความสวยงามด้วยกันทั้งสิ้น แต่ก็มีคำถามถึงเรื่องความงามว่าเราจะตัดสินคุณค่านี้อย่างไร โอทโท จึงเสนอแนวทางในการพิจารณาคุณค่าเรื่องความงามที่สัมพันธ์กับชีววิทยา ซึ่งมาจากการศึกษาวิจัยของเธอ

โอทโท อ้างถึงสิ่งที่สวยงามตามธรรมชาติ เช่น ผุยนกนางนวล การเติบโตของต้นไม้ พรรณไม้มีหนามชนิดต่างๆ ซึ่งมีกระบวนการพัฒนารูปแบบของตนเอง มีการพลังงานที่น้อยในกระบวนการพัฒนานี้ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการก่อร่างสร้างรูปทรงที่เหมาะสมที่สุด (Optimalkonstruktionen)

โอทโท ยังเสนอว่า ความสามารถรับรู้ความงามนั้นเป็นคุณสมบัติติดตัวมนุษย์มาแต่กำเนิด อย่างไรก็ตาม มนุษย์ใช้ว่าจะมีเหตุผลเสมอไปในการตัดสินใจในการกระทำ แต่มักทำอะไรตามอารมณ์ เมื่อพิจารณาแล้ว เราพบว่ามันสร้างรังที่มีประโยชน์ใช้งานถูกต้องพอดีทั้งที่มันไม่มีความคิดเรื่องประโยชน์ใช้สอย มนุษย์และสัตว์มีสัญชาตญาณเรื่องรูปทรง สี และปรากฏการณ์ทางเสียงติดตัวมาแต่กำเนิด ต่อประเด็นนี้โอทโทเสนอว่า สุนทรียะ เป็นสิ่งที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของการใช้สอย แต่ประโยชน์ใช้สอยนั้น เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุทั้งหลาย

อย่างไรก็ดี โอทโทเองให้คุณค่าต่อความงาม ซึ่งเป็นเรื่องที่สูงขึ้นกว่าประเด็นการใช้สอย และคุณค่าเรื่องความงามนี้เป็นอีกหนึ่งในหลักการออกแบบโครงสร้างเบาด้วย โอทโทเชื่อว่ามนุษย์สามารถเข้าใจสิ่งสวยงามที่อยู่เหนือกว่าประโยชน์ใช้สอยได้ สามารถปล่อยให้เปลือยเปลือยกับสิ่งสวยงาม สามารถแยกแยะได้ว่าส่วนใดเป็นประโยชน์ใช้สอย และส่วนใดเป็นความงาม

สำหรับหลักการออกแบบโครงสร้างเบา นั้น เป็นการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของ มวล และแรงกระทำ (ตามกฎของนิวตัน) ซึ่งสมการนี้ปรากฏอยู่ในสิ่งรอบตัวเรา ตั้งแต่อะตอม โมเลกุล เทหวัตถุ กาแล็คซี่ ภูเขา หรือในส่วประกอบต่างๆของมนุษย์เราเอง ตั้งแต่เส้นผม ฟัน กระดูก หรือในสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ตั้งแต่ระดับเซลล์เล็กๆจนกระทั่งถึงสัตว์ขนาดใหญ่ กล่าวได้ว่าหลักการออกแบบโครงสร้างเบาสนใจเรื่องประสิทธิภาพของรูปทรง มากกว่าประโยชน์ใช้สอย และสิ่งมีชีวิต เช่น มนุษย์หรือสัตว์นั้น เป็นไปตามหลักการนี้ ดังนั้น จึงมีคุณค่าเชิงสุนทรียะ

ความเหมาะสมลงตัวพอดี (Vollendetseins) ของประโยชน์ใช้สอยและรูปทรง เป็นอีกหลักการหนึ่งของการออกแบบโครงสร้างเบาของโอทโท โดยให้ความสำคัญกับความสัมพันธ์ของการรับรู้รสและความถูกต้องของระบบโครงสร้าง ยกตัวอย่างเทียบเคียงกับสถาปัตยกรรมที่ยิ่งใหญ่ในอดีต เช่น แพนธีออน (Pantheon) หรือ ฮาเกีย โซเฟีย (Hagia Sophia) ความเหมาะสมลงตัวในธรรมชาติหรือที่เรียกว่า ความน้อย (minimalism) นั้น เป็นสิ่งที่ควรศึกษา และข้อสังเกตหนึ่งคือเรื่องสมมาตร ในสัตว์ มนุษย์ โดยความสมมาตรถือเป็นพื้นฐานของความงาม ความสมบูรณ์

ไพร โอทโท เสนอประเด็นการพิจารณาเรื่องสุนทรียะว่าประกอบด้วยสองส่วน คือ จิตวิญญาณ และวัตถุ มนุษย์พยายามมองหา ความพิเศษ (Besondere) และความเป็นศิลปะ (Künstlerische) จากวัตถุทั้งหลาย ซึ่งตัววัตถุเองยังทำหน้าที่เป็นสัญลักษณ์เพื่อสื่อถึงบางสิ่งด้วย เช่นเดียวกับสถาปัตยกรรม มิใช่มีหน้าที่เพียงแค่ประโยชน์ใช้สอย แต่ยังมีความหมายในเชิงสัญลักษณ์ด้วย เช่น การแบ่งขอบเขต การป้องกันจากภัยต่างๆ ซึ่งบางครั้งการแสดงออกเหล่านี้ก็กลายเป็นการสร้าง ความประทับใจแบบลวง

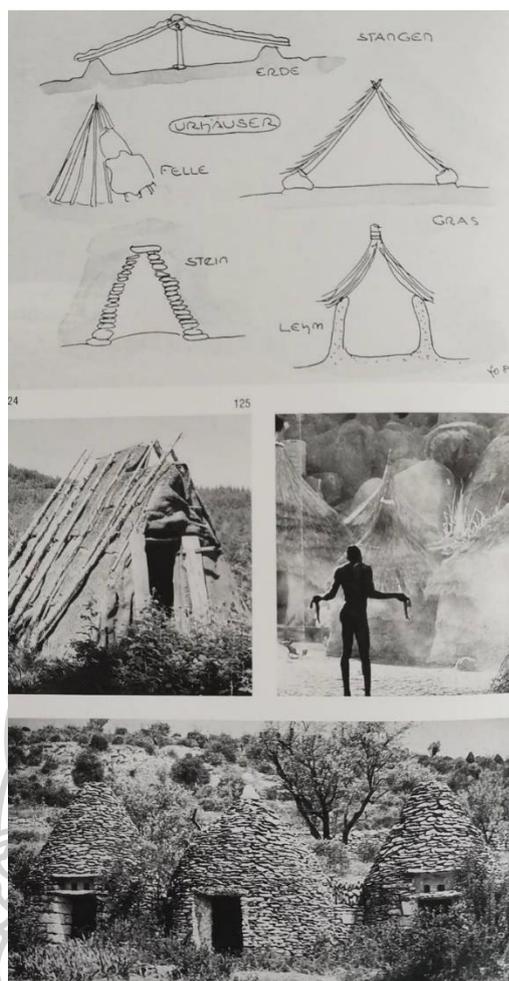
โอทโทวิจารณ์การทำงานของศิลปิน ซึ่งมักตีความความประทับใจจากสิ่งต่างๆรอบตัวเพื่อนำมาสร้างสรรค์เป็นผลงาน เช่น รูปร่าง รูปทรง องค์ประกอบต่างๆในธรรมชาติ การพยายามสร้างความประทับใจ (Das Imponieren) นำไปสู่การ เสสร้างแบบหนึ่ง

ความดึงดูด (Ansprchend) เป็นคุณสมบัติสำคัญหนึ่งของสุนทรียะ สัมพันธ์กับความชำนาญในทักษะของการสร้างสรรค์ อย่างไรก็ตามการลอกเลียนแบบเพื่อให้เกิดความดึงดูดนั้น เป็นเพียงการเสสร้าง โอทโทเชื่อว่า สุนทรียะไม่ใช่เรื่องที่สร้างขึ้น หรือการเรียนตามตำรา แต่เป็นการปล่อยให้เกิดความเข้าใจในธรรมชาติ ทั้งนี้วัตถุทั้งหลายควรถูกประกอบขึ้นจากความเหมาะสมทางเทคนิค (technisch optimiert) จึงจะมีความงาม

สำหรับความงามในระดับจิตวิญญาณของโครงสร้างเขาไม่ใช่จิตวิญญาณแบบเดียวกับที่อยู่ ในบทประพันธ์หรือปรัชญา แต่เป็นการประกอบรวมกันของวัสดุหรือองค์ประกอบต่างๆ สุนทรียะในงานสถาปัตยกรรมนั้นประกอบขึ้นจากหลายมิติ การออกแบบโครงสร้างเขานั้นมีความสัมพันธ์อยู่กับเจตจำนงของธรรมชาติ ซึ่งเป็นหนึ่งเดียวกันทั้งหมดกับสรรพชีวิต การรับรู้คุณค่าสุนทรียะในรูปทรงของโครงสร้างเขาผ่านสองประเด็นคือ รูปทรง (Bauform) และกระบวนการ (Prozesse) ซึ่งมาจากการค้นพบในการศึกษาและทดลอง จึงเป็นความงามบริสุทธิ์ ไม่ใช่สิ่งแปลกปลอม (ibid.: 203)

จากที่กล่าวมาข้างต้น สอดคล้องกับบทความวิพากษ์งานออกแบบสถาปัตยกรรมหอดิลปะแห่งเมืองซตุท์ทการ์ท ดังที่โอทโทได้เคยกล่าวผ่านหนังสือพิมพ์ท้องถิ่นเมื่อปี ค.ศ.1977 โดยมีการขยายความเรื่องการจูงใจออกแบบของสถาปนิกที่พยายามเสสร้างงานสถาปัตยกรรมผ่านวาทกรรมและแนวความคิดแบบตนเองเป็นใหญ่ว่ากลายเป็นการเสสร้างของผู้ออกแบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นงานออกแบบที่ตนเองต้องการ ซึ่งผลที่สุดแล้ว ความงามที่เกิดขึ้นนั้นจึงกลายเป็นเพียงสิ่งแปลกปลอม

บทหนึ่งจากหนังสือ การก่อรูป: ว่าด้วยการก่อรูปทรงในธรรมชาติ งานเทคนิค และสถาปัตยกรรม (Gestaltwerdung: Zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst) (Frei Otto, 1988: 4-16) โอทโท พูดถึงจุดเริ่มต้นของงานเทคนิคว่าพัฒนาการของงานเทคนิคนี้มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการใช้มือของมนุษย์ แรกเริ่มมนุษย์ใช้งานฝีมือเชิงเทคนิคเพื่อแก้ปัญหา ให้ตัวเองอยู่รอดได้ในสภาพแวดล้อม

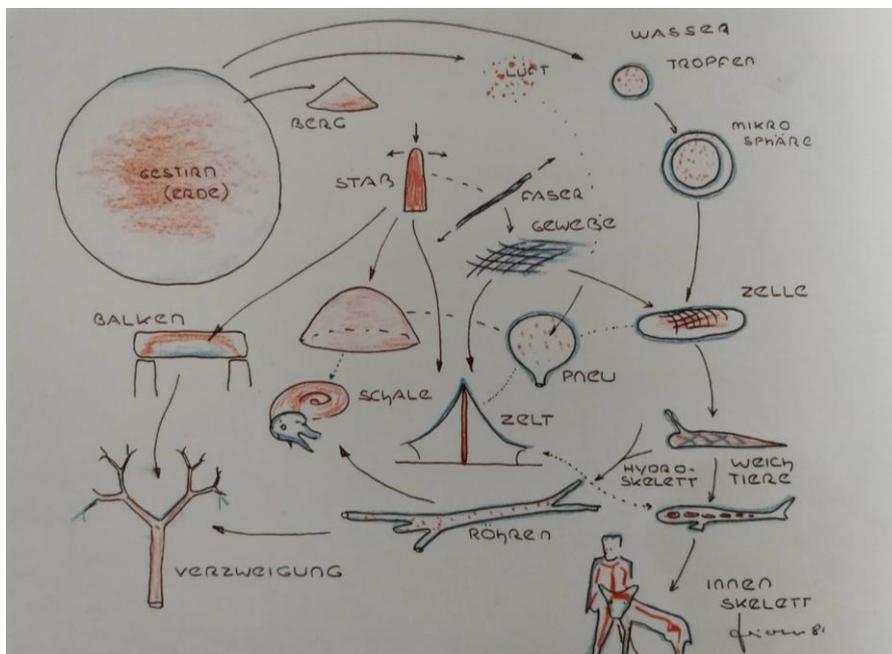


ภาพที่ 106 แสดงการวิเคราะห์รูปทรงทางสถาปัตยกรรมของมนุษย์ในยุคโบราณโดยไฟร โอทโท ซึ่ง
ต้องอาศัยคุณสมบัติของวัสดุในการประกอบกันขึ้นเป็นรูปทรง
ที่มา: Frei Otto, 1988: 40

นอกจากตั้งคำถามเรื่องความเข้าใจในธรรมชาติแล้ว โอทโทได้เสนอสามปัจจัยสำหรับการ
สร้างสรรค์งานออกแบบว่า ประกอบด้วย ความจริงแท้ (die Wahrheit) ความคิดคำนึงในเชิง
วิทยาศาสตร์ (Glauben an die Wissenschaft) และความปรารถนา (die Wünchen) ซึ่งเมื่อมีการ
คิดคำนึงในเชิงวิทยาศาสตร์ จะทำให้เกิดการคิด การทบทวน การทำอย่างเป็นระบบ คำนึงถึง
ความสัมพันธ์ของความจริงกับศิลปะ และเชื่อมโยงความจริงไปสู่งานศิลปะ นั่นทำให้บรรลุถึงความ
งาม (der Aesthetik) (ibid.: 77-78)

ในปี ค.ศ. 2002 ไฟร โอทโท ได้แสดงปาฐกถาที่เบอร์ลิน และต่อมาได้รับการตีพิมพ์รวม
เล่มในหนังสืออีกครั้งในปี ค.ศ. 2005 โดยได้กล่าวถึงประเด็นของการสร้างสรรค์งานออกแบบ
สถาปัตยกรรมและสุนทรียะ โอทโท เสนอว่า สถาปนิกควรคำนึงถึงกำลังแรงงาน พลังงาน และวัสดุ ที่

ต้องใช้ในการก่อสร้าง ด้วยเหตุดังนี้ สถาปนิกจะไม่ทำงานที่ทำให้เกิดอันตรายหรือความเสียหายแก่มนุษย์ รวมถึงธรรมชาติด้วย ดังนั้น เราจะต้องคิดใหม่เพื่อการสร้างสรรค์ที่ไม่ทำลาย



ภาพที่ 107 ภาพร่างแสดงแผนภาพความสัมพันธ์ของกระบวนการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งวิวัฒน์ตัวเองจนกลายเป็นรูปทรงต่างๆกัน เขียนโดยไฟร โอทโท เมื่อปี ค.ศ.1981

ที่มา: Winfried Nerdinger, 2005: 154

โอทโทยอมรับนวัตกรรมใหม่ทางด้านเทคโนโลยีการก่อสร้างว่าเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งในการสร้างสรรค์สถาปัตยกรรม เขาจึงเสนอแนวคิดเรื่อง สุนทรียะนวัตกรรม (aesthetic innovation) ขึ้น โดยอธิบายว่าสุนทรียะนวัตกรรมนั้น อยู่เหนือกาลเวลาและเป็นอิสระจากแฟชั่น กระแส หรือสิ่งที่เป็นความสนใจชั่วคราวชั่วคราว เกณฑ์และกระบวนการสร้างสรรค์สุนทรียะนวัตกรรม นี้แตกต่างจากนวัตกรรมเชิงเทคโนโลยี ซึ่งในตัวสถาปัตยกรรมเองก็ประกอบไปด้วยนวัตกรรมทั้งสองแบบนี้ ในขณะที่นวัตกรรมเชิงเทคโนโลยีนั้นแสดงให้เห็นถึงพัฒนาการที่เป็นลำดับตามเส้นเวลา แต่สุนทรียะนวัตกรรมนั้นเป็นสิ่งที่จริงเหนือข้อกำหนดของเวลา มันจึงกลายเป็นสิ่งซึ่งถูกผลักดันให้ปรากฏชัดในประวัติศาสตร์ (Winfried Nerdinger, 2005: 124-129) จากแนวคิดเรื่องสุนทรียะนวัตกรรมนี้เองที่ทำให้มองเห็นความเชื่อมโยงกับบริบททางความคิดของชนชาติเยอรมัน ที่ใส่ใจเรื่องพัฒนาการของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมที่ไม่หยุดนิ่ง โดยนัยยะของไฟร โอทโท นี้ อาจแสดงถึงการหลีกเลี่ยงจากรูปแบบและวิธีการในการออกแบบที่ถูกผูกติดกับประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมในเชิงกายภาพ แต่พยายามเชื่อมโยงไปสู่วัฒนธรรมทางความคิดในการเป็นนักคิดนักพัฒนา ซึ่งส่งผลให้โอทโทคิดค้นวิธีการออกแบบในลักษณะใหม่ และมีกระบวนการที่เป็นเชิงวิทยาศาสตร์

จากการศึกษาสามารถวิเคราะห์ได้ว่า สุนทรียะหรือความงามตามแนวคิดของไฟร โอทโท นั้น ส่วนหนึ่งเป็นแนวคิดในการสร้างสรรค์งานออกแบบที่เชื่อมโยงอยู่กับจริยศาสตร์ หรือเรื่องของ ความถูกต้อง ดีงาม และมีความสอดคล้องกับปรัชญาสุนทรียศาสตร์ของนักปราชญ์เยอรมัน คือ แนวคิดเรื่องการรับรู้ความงาม ว่าเป็นสิ่งที่ติดตัวมนุษย์มาแต่กำเนิด ของอเล็กซานเดอร์ โอทท์ลีบ โบรม การ์เทิน (Alexander Gottlieb Baumgarten)

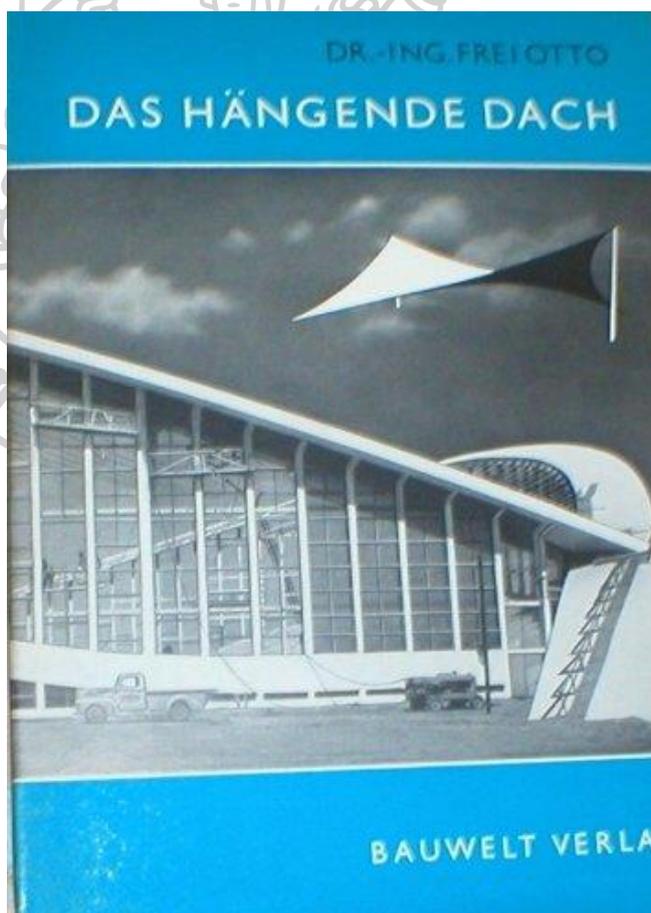
แนวคิดเรื่องการก้าวพ้นจากประโยชน์ใช้สอยและการเป็นสถาปัตยกรรมที่ตื้นนั้น สัมพันธ์กับ แนวคิดของ อิมมานูเอล คานท์ (Immanuel Kant) ที่เสนอเรื่องความพึงใจ และมโนทัศน์หลัก 4 ประการ สำหรับตัดสินความงาม ประกอบด้วย 1. การไม่เกี่ยวข้องกับประโยชน์ (disinterestedness) 2. ความเป็นสากล (universality) 3. ความจำเป็น (necessity) และ 4. รูปแบบของเป้าหมาย (the form of purpose) และยังมีความสอดคล้องกับแนวคิดของ เกอร์ฮาร์ด วิลเฮล์ม ฟรีดริช เฮเกล (Georg Wilhelm Friedrich Hegel) ในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับความงามใน ธรรมชาติ โดยพิจารณาจากแนวคิดเรื่องรูปทรงในธรรมชาติ ซึ่งถูกสังเกต ศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้ ในการออกแบบโครงสร้างเบาของเขา รวมถึงประเด็นของหน้าที่ของศิลปะที่จะต้องแสดงให้เห็นถึง ความเป็นไปของยุคสมัยที่มันถูกสร้างขึ้นด้วย

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาตามหลักสามประการของวิทรูเวียส (Vitruvius Pollio, Morgan, & Warren, 1914) แล้ว ความงามตามแนวคิดของไฟร โอทโทนั้น ก้าวพ้นขอบเขตของประโยชน์ใช้ สอย ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานของคุณลักษณะของสถาปัตยกรรม และมีการคำนึงถึงความเป็นไปได้ของ โครงสร้างในรูปทรงต่างๆ ดังนั้น แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างเบาของโอทโท จึงประกอบด้วย องค์ประกอบครบทั้งสามด้านของการเป็นสถาปัตยกรรม

ปรัชญาเรื่องคุณค่าในงานออกแบบของ ไฟร โอทโท ดังได้กล่าวมานั้น ยังสอดคล้องกับ ความชื่นชมส่วนตัวของโอทโทในผลงานออกแบบของนักออกแบบคนสำคัญหลายท่านที่สร้างสรรค์ งานออกแบบบนแนวคิดแบบเหตุผลนิยม หรือเป็นวิทยาศาสตร์ เช่น งานออกแบบสนามกีฬาราล์ก อารีน่า (Raleigh Arena) ซึ่งออกแบบโดย แมทธิว โนวิกคิ (Matthew Nowicki) และ เฟรด เซเวอรูด (Fred Severud) ซึ่งได้กลายเป็นแรงบันดาลใจให้โอทโทเขียนดุชฎินิพนธ์เรื่องโครงหลังคารับแรงดึง เมื่อปี ค.ศ.1954 ความชื่นชมนี้ถูกแสดงออกอย่างชัดเจนในการตีพิมพ์ขึ้นเป็นปกหนังสืองานดุชฎินิพนธ์ของเขา



ภาพที่ 108 สนามราเลย์ อารีนา ที่ นอร์ธ แคโรไลนา สหรัฐอเมริกา
ที่มา: <http://www.ncmodernist.org/>



ภาพที่ 109 ปกงานดุชฎินิพนธ์เรื่องโครงหลังคารับแรงดึง โดยไฟร โอทโท
ที่มา: Frei Otto, 1954

5.7 ภาววิสัยในแนวคิดทางการออกแบบของไฟร โอทโท

โอทโทได้เขียนบทความแสดงจุดยืนเรื่องการออกแบบของเขาในซึ่งได้รับการตีพิมพ์เมื่อปี ค.ศ. 2017 โดยแสดงออกถึงความไม่ใส่ใจเรื่องของรูปทรงที่เป็นไปตามกระแสของการสร้างสถาปัตยกรรมร่วมสมัย แต่มองตัวเองว่าเป็นผู้ศึกษาเพื่อหาสาระสำคัญของรูปทรงต่างๆ และได้ย้ำถึงแนวคิดน้อยแต่มาของเขาคือ การใช้วัสดุที่น้อย ปรับเปลี่ยนได้ ใช้พลังงานน้อย เพื่อตอบสนองการใช้สอยของมนุษย์ ผสานกลมกลืนกับผิวโลก น้ำ และอากาศ การสร้างโดยคำนึงถึงการอยู่ร่วมกับธรรมชาติจะต้องถูกคิดตั้งแต่เส้นแรกที่เราลากเพื่อสร้างสมดุลระหว่างการสร้างอาคารกับรองรับกิจกรรมของมนุษย์กับโลก และยังคงกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการสร้างกลุ่มวิจัยร่วมกับนักชีววิทยารวมถึงการศึกษามุมมองถึงกำเนิดของรูปทรงบนสมมติฐานว่า รูปทรงปฐมของชีวิตนั้นกำเนิดมาจากของเหลว ซึ่งถูกบรรจุไว้ในโครงสร้างท่อหุ้มที่เบาที่สุด ก่อนจะขยายตัวเป็นสาหร่าย แบคทีเรีย และสิ่งมีชีวิตอื่นในลำดับต่อมา (Frei Otto, 2017: 8-11)

เมื่อพิจารณา เบื้องหลังกายภาพ และการทดลอง ศึกษา ทั้งหมดของไฟร โอทโทนั้น ยังมีปรัชญาในการออกแบบเฉพาะที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นกรอบแนวคิดหลักในการสร้างสรรค์งานออกแบบทั้งหมดของเขาด้วย กล่าวคือ หลักการสามประการในการออกแบบ อันประกอบด้วย ความจริงแท้ (Wahrheit) ความคิดคำนึงในเชิงวิทยาศาสตร์ (Glauben an die Wissenschaft) และการนำเสนอความคิดใหม่ (Wünschen) เพื่อบรรลุถึงรูปทรงอุดมคติ เมื่อพิจารณาหลักการสามประการข้างต้น จะพบว่ามีความโน้มเอียงไปสู่ปรัชญาเหตุผลนิยม ซึ่งเป็นรากปรัชญาของเยอรมนีซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับโดยนักปรัชญาคนสำคัญ เช่น เกออร์ก ฟรีดริช เฮเกล (George Friedrich Hegel) เอ็มมานูเอล คานท์ (Immanuel Kant) ปรัชญาเมธีชาวเยอรมัน เป็นต้น และเมื่อพิจารณาในเชิงกลุ่มความคิดทางการออกแบบสถาปัตยกรรม จะพบว่าใกล้เคียงกับแนวคิดของกลุ่มประโยชน์ใช้สอยนิยม (functionalism) ที่สืบรากมาจากปรัชญาเหตุผลนิยมเช่นกัน อันเป็นการออกแบบโดยตัดทอนความเฉพาะกลุ่ม วัฒนธรรม และประวัติศาสตร์

หลักการสามประการข้างต้นนั้น ถูกใช้ผ่านเครื่องมือที่โอทโทสร้างขึ้นสองชิ้น คือ จินตนาการพัฒนาการ (evolutionäre Phantasie) ซึ่งเป็นเรื่องของแนวคิดในเชิงนามธรรม ซึ่งเชื่อมโยงกับแนวคิดเรื่องจิตวิญญาณแห่งยุคสมัย (Zeitgeist) ที่จะเชื่อมโยงปรัชญาการพัฒนาเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมของเยอรมนีให้เป็นแนวคิดในการออกแบบ ทำให้สถาปัตยกรรมนั้นต้องมีความร่วมสมัยกับเทคโนโลยี และ สุนทรียะนวัตกรรม (aesthetic innovation) ซึ่งเป็นเครื่องมือของการทดลองทางรูปธรรมหรือเชิงเทคนิค เพื่อการก้าวข้ามสถาปัตยกรรมแบบประวัติศาสตร์ หรือรูปแบบเดิมที่ถูกยึดถือกันมา และนำไปสู่อิสรภาพในการสร้างสรรค์แบบใหม่ของตนเองซึ่งมีความสอดคล้องกับพัฒนาการของยุคสมัยที่สถาปัตยกรรมนั้นถูกสร้างสรรค์ขึ้น

แนวทางการออกแบบของไฟร โอทโท เป็นกระบวนการที่ตั้งอยู่บนฐานคิดแบบวิทยาศาสตร์ เป็นการผสมผสานวิธีคิดแบบสถาปนิกกับวิศวกรเข้าด้วยกัน เป็นการสร้างกระบวนการออกแบบที่ดำเนินไปพร้อมกัน ต่างจากวิธีการปกติที่สถาปนิกออกแบบรูปทรงก่อน แล้วจึงส่งต่อให้วิศวกรวิเคราะห์คำนวณ แต่ใช้ข้อกำหนดจากแรงกระทำกับระบบโครงสร้างและวัสดุ เป็นปัจจัยในการก่อรูป

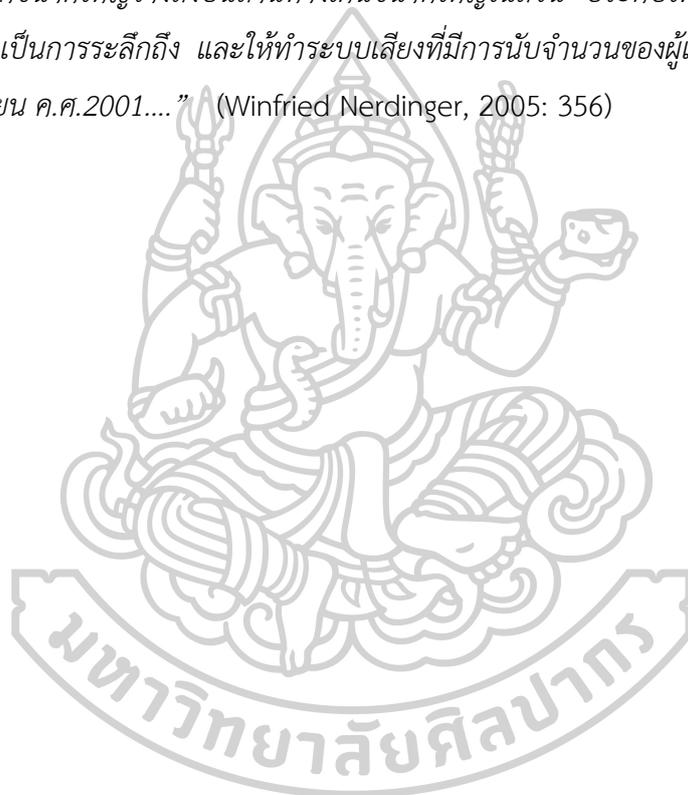
ในประเด็นการศึกษาเรื่องรูปทรงของโอทโทนั้นพบว่า โอทโทสนใจศึกษา กระบวนการก่อรูปด้วยตนเอง ของสิ่งต่างๆในธรรมชาติ โดยได้ศึกษากระบวนการก่อรูปทรงจากวัตถุศึกษาสามกลุ่ม คือ กระบวนการในการก่อรูปของรูปทรงในธรรมชาติที่มีชีวิต กระบวนการในการก่อรูปของรูปทรงในธรรมชาติที่ไม่มีชีวิต และกระบวนการในการก่อรูปของรูปทรงที่มนุษย์สร้างขึ้นด้วยเงื่อนไขของแรงกระทำในธรรมชาติ เช่น ซุ้มโค้ง (arch) การศึกษากระบวนการก่อรูปทรงต่างๆดังกล่าวนี้ เป็นการศึกษาที่ไม่อิงตัวบุคคลผู้ออกแบบหรือแนวคิดในการออกแบบ โอทโทเองใช้กระบวนการในการสังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ด้วยเหตุนี้ ความเป็นปัจเจกของผู้ศึกษาจึงถูกกันออกจากกระบวนการ ซึ่งในที่สุดแล้ว โอทโท ได้ศึกษาลึกไปถึงเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นปฐมของรูปทรงและการรับรู้รูปทรงของมนุษย์ในฐานะสิ่งมีชีวิตนั่นเอง การย้อนกลับไปสู่จุดกำเนิดของรูปทรงและการรับรู้รูปทรงเช่นนี้เอง ที่ทำให้ทั้งผู้สร้างสรรค์และรูปทรงกลายเป็นหนึ่งเดียวกัน ไม่มีรูปทรงที่ถูกสร้าง และผู้สร้างรูปทรงซึ่งเป็นปัจเจก อาจสรุปได้ว่าหลักการที่ไฟร โอทโทใช้เป็นหลักคือ กระบวนการก่อรูปด้วยตนเอง และ ความสัมพันธ์ของรูปทรง แรงกระทำ และมวล ตามหลักประสิทธิภาพของโครงสร้างตามสมการ BIC

นอกจากนี้ เมื่อย้อนพิจารณาถึงลักษณะนิสัยส่วนตัวบางประการของไฟร โอทโท ผ่านการทำงานออกแบบและงานประพันธ์ต่างๆของเขา จะพบว่า ไฟร โอทโทนั้น ไม่เคยสร้างงานออกแบบโดยลำพังคนเดียวเลย แต่มักจะอยู่ในรูปของทีมงานออกแบบเสมอ ซึ่งในทีมมักจะประกอบด้วยกลุ่มบุคคลจากวิชาชีพสถาปัตยกรรม และวิศวกรรมโครงสร้าง หรือบางครั้งยังมีผู้เชี่ยวชาญเฉพาะสาขาอื่นประกอบด้วย โดยโอทโทจะใช้ความเป็นผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านเรื่องการออกแบบโครงสร้างเบาช่วยทำให้โครงการประสบความสำเร็จ เช่น การร่วมกับ กุทโบรท ในงานออกแบบศาลาเยอรมัน ที่เมืองมอนทรีอัล ในปี ค.ศ.1967 เป็นที่ปรึกษาให้กับเบธนิช เรื่องการออกแบบโครงหลังคารับแรงดึงในโครงการสนามกีฬาโอลิมปิก ที่เมืองมิวนิก ในปี ค.ศ.1972 เป็นที่ปรึกษาเรื่องการออกแบบโครงสร้างให้กับ ชิเงรุ บัน ในการออกแบบศาลาญี่ปุ่น ที่เมืองฮันโนเฟอร์ เมื่อปี ค.ศ.2000 หรือเป็นที่ปรึกษาเรื่องการออกแบบโครงสร้างสถานีรถไฟซตุทท์การ์ท ให้กับอิงเงนโฮเฟิน ในช่วงท้ายของชีวิต เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2001 มัคซ์ โพรเทค (Max Protech) ได้เชิญโอทโทให้เข้าร่วมประกวดออกแบบโครงการเวิร์ลด์เทรด เซ็นเตอร์ แห่งใหม่ (New World trade center) หลังจากเหตุการณ์ก่อการร้าย

ในสหรัฐอเมริกา โทโทได้ปฏิเสธการทำงานประกวดครั้งนั้น แต่ได้เขียนจดหมายพร้อมกับภาพร่างถึงแม็กซ์ โดยมีเนื้อความอธิบายถึงแนวคิดในการออกแบบไว้ว่า

“....การที่จะสร้างอาคารหลังใหม่นั้น ไม่มีความจำเป็นเลย ขอให้เก็บเศษขยะออกจากพื้นที่ให้เรียบร้อย ไม่ว่าจะเป็นเศษคอนกรีต เหล็ก หรืออื่นๆ แล้วจัดให้เป็นสวนสาธารณะที่มีบึงน้ำและต้นไม้ ทำการป้องกันพื้นที่ให้ตรงกับมันคือพื้นที่มรดกโลก สำหรับเจ้ากระดูกของผู้ชายคนนั้น ให้นำดินจากแผ่นดินเกิดของแต่ละคนมาผสมกันเป็นเนินเขาแล้วปลูกดอกไม้ไว้บนนั้น สำหรับหลุมใหญ่สองหลุมที่เป็นตัวอาคารเดิม ให้ทำเป็นบ่อน้ำที่มีต้นไม้รอบสำหรับเป็นที่สวดมนต์และระลึกถึงผู้จากไป ให้ทำแผนที่โลกขนาดใหญ่วางลงบนลานทางเดินขนาดใหญ่ในสวน ประดับไฟไว้ที่ประเทศบนแผนที่ที่มีผู้สูญเสียเพื่อเป็นการระลึกถึง และให้ทำระบบเสียงที่มีการนับจำนวนของผู้เสียชีวิตจากเหตุการณ์ในวันที่ 9 กันยายน ค.ศ.2001....” (Winfried Nerdinger, 2005: 356)



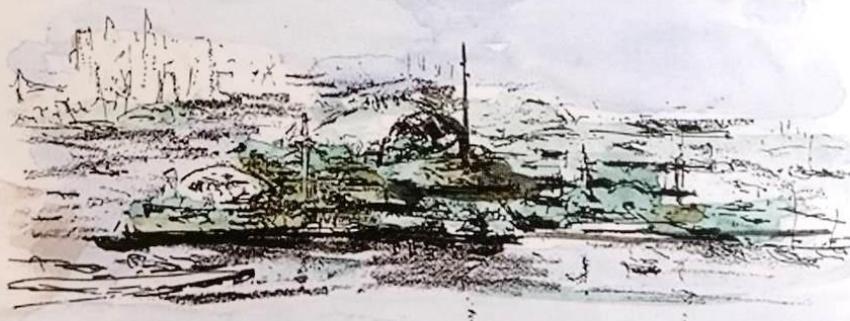
Frei Otto

Berghalde 19 71229 Leonberg Tel. 0049-7152-41084
Fax. 0049-7152-43908To Mr. Max Protetch Fax 212.691.4342
511 W 22nd Street, New York, N. Y. 10011-1109

Dear Max,
When you asked me to design a New World Trade Center I said, no I can't, because it is too early to make final decisions. But you convinced me to give at least my thoughts by sketching.



A new tower of Babel is not needed. But I think that there must remain a sign for memory. The site has to be cleared from all artefacts as steel, concrete etc. and to be protected as a world heritage in a peaceful city park with ponds and trees. All human relicts will be collected within a hill, covered with earth from the victims' home countries, planted with flowers. The remaining two big holes - full of water and surrounded by trees - are ponds of memory and prayer. On a big world map, which is integrated in the pavement of an open space in the park, all countries at war are marked by lights, reminding of man's suffering. A special board announces continuously the number of all people killed by war from the 11th September 2001 forward.



If a replacement of a World Trade Center is unavoidable for the near future I would see it as a low-rise green city on swimming platforms anchored in sight of Manhattan.

12 December 2001

Frei Otto

ภาพที่ 110 จดหมายและภาพร่างแนวคิดในการออกแบบโครงการเวิร์ลด์เทรด เซ็นเตอร์ แห่งใหม่
ถึง มักซ์ โพรเทค

ที่มา: Winfried Nerdinger, 2005: 356

โอทโทเองมักจะพอใจกับการบอกกับคนอื่นว่าเป็นคนออกแบบเด่นชัด และมักพูดถึงตนเองว่าเป็นเพียงนักสร้างวิมานในอากาศ หรือแม้กระทั่งกล่าวว่าตนเองนั้นเป็นเพียงผู้เฝ้าสังเกตและศึกษากระบวนการของธรรมชาติเท่านั้น (จากบทสัมภาษณ์ในสารคดี Frei Otto: spanning the future, 2017) (Juan Maria Songel, 2010: 14,) เหล่านี้ ผู้วิจัยเห็นว่าเป็นสิ่งสะท้อนให้เห็นความพยายามในการรักษาแนวทางของความเป็นนักวิทยาศาสตร์ ที่วางตัวเป็นกลาง และไม่ประกาศตัวในลักษณะอวดโอ้ได้ในระดับหนึ่งด้วย

กล่าวโดยสรุป การสร้างแนวความคิดในการออกแบบของไฟร โอทโทเริ่มต้นจากการสังเกตซึ่งเป็นกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เมื่อพิจารณาจากงานดุชฌีนิพนธ์ซึ่งแสดงให้เห็นจุดเริ่มต้นของงานวิจัยจากการสังเกตสะพานในงานวิศวกรรมซึ่งต้องพาดช่วงกว้างมาก ๆ จากนั้นจึงเริ่มเปรียบเทียบกับ การออกแบบหลังคาเพื่อคลุมพื้นที่ที่กว้างมาก ๆ ซึ่งเป็นงานสถาปัตยกรรม แล้วจึงมีการตั้งสมมติฐานเพื่อเสนอความคิด วิธีการและกระบวนการในการออกแบบใหม่ ซึ่งเป็นการบูรณาการความรู้และวิธีการแบบข้ามศาสตร์ ระหว่างการออกแบบสถาปัตยกรรมกับการออกแบบโครงสร้างในเชิงวิศวกรรม ซึ่งผลงานการศึกษานี้เองที่เป็นเครื่องมือสำหรับการทดลองออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างจริงในช่วงต้นของการทำงานของโอทโท

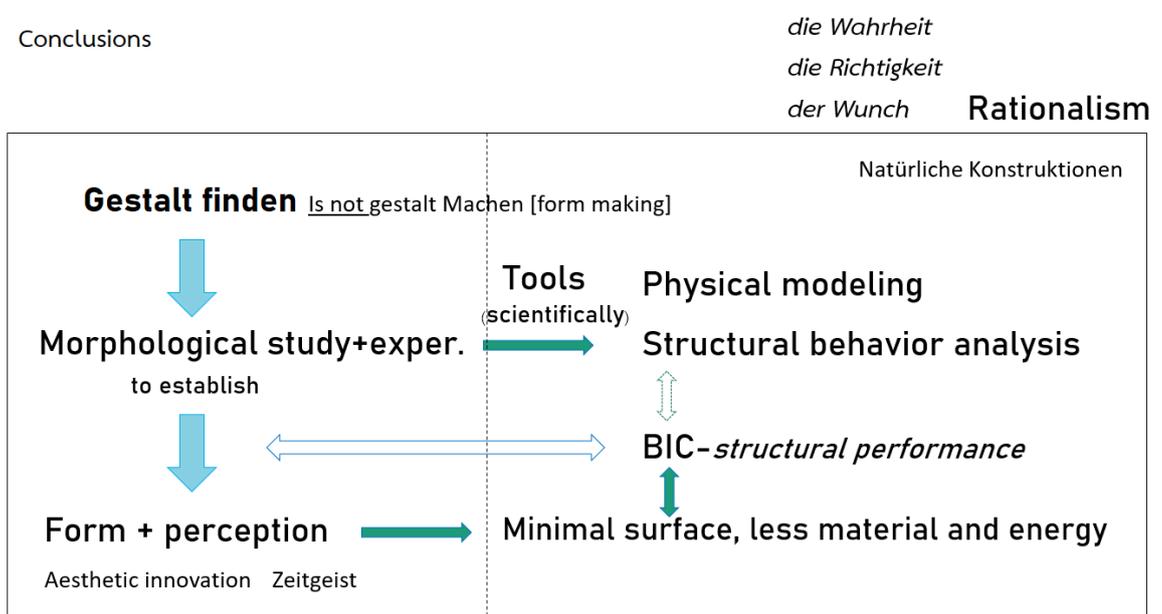
ต่อมาเมื่อได้ทำงานเป็นอาจารย์มหาวิทยาลัยและก่อตั้งสถาบันวิจัยของตนเองได้ โอทโทได้ร่วมมือกับนักชีววิทยา เพื่อผสมเอาชีววิทยาเข้ามาผสมในงานออกแบบ ทำให้เกิดการวิจัยที่เป็นปลายเปิดมาก และเป็นส่วนที่ทำให้ผู้ศึกษางานของโอทโทเกิดความสับสน และเข้าใจเอาว่า การออกแบบธรรมชาติของโอทโทนั้น คือการศึกษาโครงสร้างจากสิ่งต่าง ๆ ในธรรมชาติ แล้วทำการประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงสร้างเบา อีกประเด็นหนึ่งซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนสำหรับผู้ศึกษางานและแนวคิดของไฟร โอทโท คือ ไฟร โอทโท ได้อธิบายถึงแนวคิดและปรัชญาการออกแบบเรื่องการออกแบบโครงสร้างแบบธรรมชาติไว้น้อย และเป็นภาษาเยอรมัน (Otto, 1976) (Otto, 1982) (Otto, 1988) เป็นส่วนที่ไม่ได้ถูกกล่าวขานในวรรณกรรมอื่น ๆ ที่เป็นภาษาอังกฤษ หรือแม้งานวิชาการของโอทโทเองที่ตีพิมพ์เผยแพร่ในช่วงก่อนหน้าก็มักจะเน้นเรื่องงานเชิงเทคนิคเป็นหลัก ทำให้ผู้ที่ศึกษางานของเขาอาจจะเข้าใจได้ว่า ไฟร โอทโท เน้นเทคนิคการก่อสร้าง

การแปลหนังสือรวบรวมแนวคิดและผลงานของโอทโท ซึ่งถูกจัดพิมพ์เผยแพร่ในโอกาสที่เขาได้รับรางวัล Deutscher Werkbund winning prize ชื่อ “Form finding: Towards an architecture of the minimal” ซึ่งถูกแปลจากภาษาเยอรมันชื่อ “Gestalt finden: Auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen” กลายเป็นชื่อที่เผยแพร่แนวคิดและผลงานของโอทโทให้เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในฐานะบทสรุปของแนวคิดและวิธีการออกแบบของเขานั้น ก็เป็นส่วนหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดความเข้าใจผิดได้เช่นเดียวกัน กล่าวคือ มีการแปลคำว่า Gestalt จากภาษาเยอรมัน เป็นคำว่า Form ในภาษาอังกฤษ ซึ่งนัยยะความหมายของสองคำนี้มีความแตกต่างกัน

เพราะในภาษาเยอรมันมีคำสองคำที่โอทโทใช้ คือ *gestalt* และ *form* อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถพบคำอธิบายหรือการขยายความเรื่อง *gestalt* นี้ในวรรณกรรมภาษาอังกฤษทั้งที่เขียนโดยไฟร โอทโทเอง หรือบุคคลอื่น นั่นยิ่งทำให้เกิดความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนและเกิดการตีความที่ผิดพลาดตามมาได้

งานออกแบบของโอทโทนั้น มุ่งหาความรู้ความเข้าใจในการออกแบบโครงสร้างที่เป็นกฎสากล ไม่มีภาษาเฉพาะทางการออกแบบ มีความเข้าใจและสามารถแก้ปัญหาเชิงเทคนิคเพื่อสร้างให้เห็นจริงได้ แม้เราจะเห็นว่ารูปทรงในงานออกแบบของโอทโทจะเน้นเรื่องโครงสร้างผ้าใบก็ตาม แต่กระบวนการในการทดลองจริง ๆ นั้น มาจากฐานคิดเรื่องประสิทธิภาพของโครงสร้าง อันเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยภายนอก คือแรงกระทำ และปัจจัยภายใน คือตัววัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างระบบของโครงสร้างที่ได้ นั้นเป็นผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ของสองสิ่งนี้ ปรัชญาการออกแบบการศึกษา วิธีการทดลองของโอทโท เป็นตัวอย่างของการผสมผสานความรู้จากศาสตร์อื่นเพื่อแสวงหาความเป็นไปได้ใหม่ในการออกแบบ มีกระบวนการศึกษาที่เป็นวิทยาศาสตร์ สามารถพิสูจน์ได้ ซึ่งสถาปนิก นักออกแบบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแนวทางการออกแบบของตนเองได้

ตารางที่ 2 สรุปการศึกษาแนวความคิดในการออกแบบของ ไฟร โอทโท



5.8 ข้อเสนอแนะ

ด้วยการศึกษาและทดลองของสถาบันออกแบบโครงสร้างเบาจำนวนมากเป็นการศึกษาปลายเปิด ทำให้สถาปนิก วิศวกร ผู้สนใจ สามารถเลือกเอาผลการศึกษาบางเรื่องของไฟร โอทโท ใน

ส่วนที่ตนเองมีความสนใจเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ได้มากมาย ไม่ว่าจะเป็นการบูรณาการความรู้ข้ามศาสตร์เพื่อสร้างสรรค์งานออกแบบและองค์ความรู้ใหม่ หรือการวิจัยเพื่อพัฒนารายละเอียดเชิงลึกในประเด็นทางด้านเทคนิค เพื่อสนับสนุนและแก้ปัญหาการก่อสร้าง เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การที่ไฟร โอทโท พยายามที่จะศึกษากระบวนการก่อรูปแบบธรรมชาตินั้น มีความซับซ้อนและหลากหลายมาก เป็นการยากที่จะพยายามสร้างกฎสากลสำหรับการออกแบบที่สามารถใช้ได้กับการออกแบบสถาปัตยกรรมทุกประเภท ดังนั้น การพิจารณาเลือกศึกษา ทดลอง และเลือกใช้ตามความเหมาะสมของแต่ละโครงการโดยไม่ยึดติดกับรูปแบบซึ่งเป็นผลลัพธ์ อาจจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

แม้ในตอนท้ายของชีวิต ไฟร โอทโท เองได้เคยกล่าวในการบรรยายพิเศษที่สถาบัน AA School of Architecture (2015) โดยถึงกระบวนการออกแบบของเขาซึ่งอ้างอิงจากระบบการก่อรูปแบบเองตามกระบวนการทางธรรมชาตินั้น เป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากมาก จนเกินกว่าที่เราจะสามารถทำได้เท่ากับธรรมชาติก็ตาม แต่ด้วยเทคโนโลยีและความรู้ที่มีมากขึ้นกว่าในอดีตของมนุษย์ ปัจจุบัน หากมีการรวมกลุ่มผู้เชี่ยวชาญจากหลากหลายสาขา อาจมีความเป็นไปได้ในการศึกษาวิจัย และพัฒนาการออกแบบโครงสร้างที่มุ่งประเด็นเรื่องประสิทธิภาพสูงดังเช่นที่ไฟร โอทโท นิยามว่า โครงสร้างเบา ได้

นอกจากนี้ จากการศึกษาพบว่า ไฟร โอทโท นั้นสร้างวรรณกรรมไว้จำนวนไม่มาก และเป็นภาษาเยอรมันเป็นหลัก สำหรับวรรณกรรมที่เป็นภาษาอังกฤษนั้น พบว่ามีเนื้อหาสาระที่ไม่ครบถ้วน และทำให้เกิดความสับสนแก่ผู้ศึกษาได้ ดังนั้น ผู้สนใจควรเลือกศึกษาเอกสารภาษาเยอรมันซึ่งถูกเขียนขึ้นโดยไฟร โอทโท ก่อนเป็นลำดับแรก

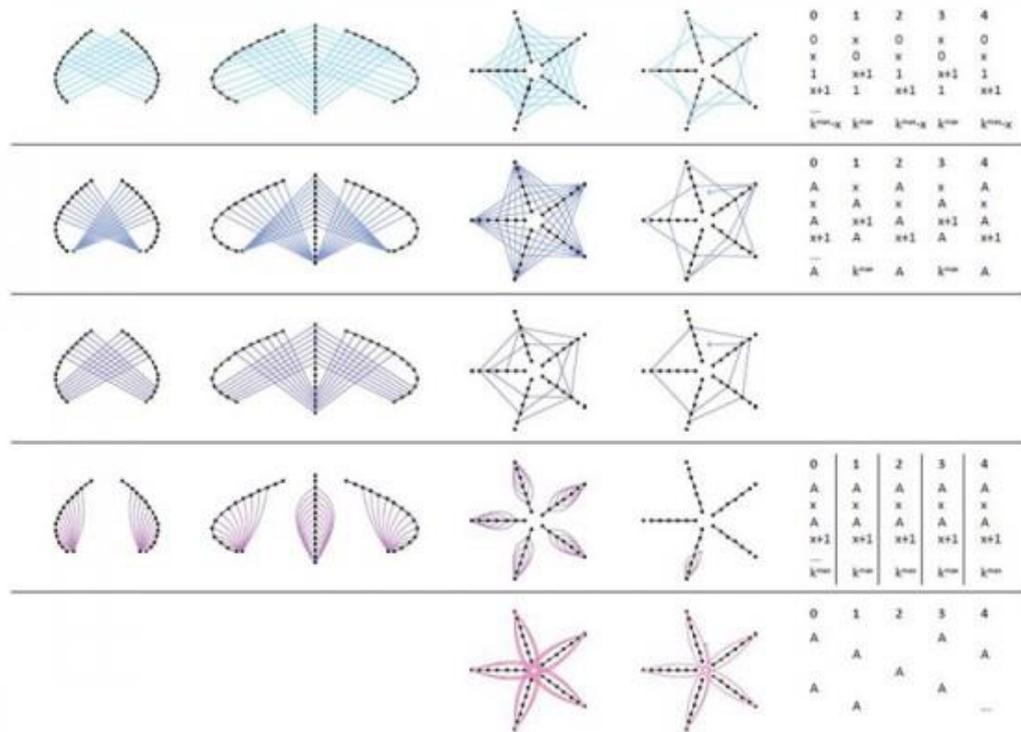
5.8.1 Parametricism ในงานสถาปัตยกรรม

กระแสของการออกแบบร่วมสมัยปัจจุบันที่เป็นผลสืบเนื่องจากการพัฒนาความรู้ด้านเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาเป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบที่เรียกว่า parametric design นั้น กำลังเป็นประเด็นที่น่าสนใจสำหรับสถาปนิก นักออกแบบ และนักวิชาการหลากหลายจากทั่วโลก แพทริค ชูมัทเชอร์ (Patrick Schumacher) สถาปนิกที่สร้างผลงานสถาปัตยกรรมในแนวทางนี้ ซึ่งเป็นอดีตลูกศิษย์ของไฟร โอทโท ที่มหาวิทยาลัยซตุทท์การ์ท ในช่วงทศวรรษที่ 1980 ได้กล่าวถึงไฟร โอทโท ในฐานะเป็นผู้บุกเบิกและวางรากฐานสำหรับการพัฒนาแนวทางการออกแบบ parametric design (Patrick Schumacher, 2014: 15) การศึกษาทำความเข้าใจแนวคิดของไฟร โอทโท นั้น เป็นพื้นฐานที่ดีสำหรับผู้สนใจในแนวทางการออกแบบใหม่นี้ เนื่องจากเป็นเหตุผลหลักเบื้องหลังการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่จะถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์กันในกระบวนการออกแบบ เพื่อสร้างระบบและรูปทรงที่เป็นผลลัพธ์ ประเด็นหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ไฟร โอทโท เองเชื่อถือในรูปทรงที่เกิดขึ้นจริงจากการ

ทำหุ่นจำลองมากกว่าการสร้างหุ่นจำลองจากแบบทางคณิตศาสตร์หรือการคำนวณ เห็นได้จากการที่เขาได้อ้างถึงอาคารบางแห่งที่มีการคำนวณอย่างดี แต่กลับพังทลายและสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน (Frei Otto, 2007: 37-40)

ข้อสังเกตหนึ่งของผู้วิจัยเห็นว่าควรต้องกล่าวถึงคือ เมื่อศึกษาแนวทางการออกแบบของไฟรโอโทโต แล้วนั้น ทำให้เราสามารถเห็นแก่นหลักของการพัฒนารูปทรงซึ่งเป็นฐานของ parametricism กล่าวคือ เป็นการใช้เครื่องมือเพื่อจำลองกระบวนการในการก่อรูป ซึ่งเกิดจากการนำเอาตัวแปร (parameter) จำนวนหนึ่ง ตามแต่โจทย์ของการออกมา มาทดลองสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกัน ซึ่งกระบวนการในการสร้างความสัมพันธ์นี้ถูกทำขึ้นด้วยเครื่องมือคือ คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีระบบโปรแกรมช่วยในการคำนวณหาความเป็นไปได้ที่มีความซับซ้อนเกินกว่ามนุษย์ธรรมดาจะใช้เวลาในการสร้างความสัมพันธ์เหล่านั้นขึ้นเอง หลังจากคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลความสัมพันธ์ของตัวแปร ซึ่งจะต้องแปลค่าเป็นสมการคณิตศาสตร์ในระหว่างการทำงาน เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงจะได้ผลลัพธ์เป็นรูปทรงต่างๆ





ภาพที่ 111 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบรูปทรงของโครงสร้าง ICD-ITKE research 2012 มหาวิทยาลัยชตุทท์การ์ท ซึ่งเป็นการสร้างความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรหลายตัวแปร เช่น วัสดุก่อสร้าง กระบวนการก่อสร้าง รูปทรงและโครงสร้างต้นแบบจากเปลือกของแมลงเปลือกแข็ง ฯลฯ

ที่มา: <http://www.formakers.eu/project-768-university-of-stuttgart-icditke-research-pavilion-2012>

ดังกล่าวนำข้างต้น จะเห็นได้ว่า กระบวนการในการก่อรูปนั้น มีการแปรค่าและปล่อยให้เกิดการพัฒนาตนเอง ซึ่งเป็นการหาคำตอบที่เป็นระบบความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ตามปัจจัยต่างๆ ที่ผู้พัฒนารูปทรงเป็นผู้ให้ข้อมูลกับระบบประมวลผล การพัฒนารูปทรงตามแนวทางนี้จึงเป็นการใช้แนวคิดเรื่องการก่อรูปด้วยตนเองตามหลักการของไฟร โอทโท อย่างไรก็ตาม หากผู้ออกแบบใช้คอมพิวเตอร์เพื่อเป็นเครื่องมือในการสร้างรูปทรง ด้วยการใส่คำสั่งต่างๆ ของโปรแกรม เพื่อสร้างรูปทรงที่มีความซับซ้อนตามที่ต้องการนั้น จะเป็นการจงใจสร้างรูปทรง ซึ่งไฟร โอทโท เรียกว่า *gestalt machen* ซึ่งเป็นวิธีการใช้ประโยชน์จากเครื่องมือเท่านั้น และจะกลายเป็นด้านตรงกันข้ามกับแนวคิด *gestalt finden* ซึ่งเป็นฐานความคิดของ *parametricism* ไปในที่สุด

ปัจจุบันแม้ว่าเทคโนโลยีดิจิทัลจะเจริญรุดหน้าไปมาก แต่ด้วยข้อจำกัดของทักษะของสถาปนิกเอง มักไม่สามารถเข้าใจกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเบื้องหลังโปรแกรม

คอมพิวเตอร์ได้ ดังนั้น การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับการออกแบบที่จะมีความเที่ยงตรง พิสูจน์ได้ และเชื่อถือได้จึงยังคงเป็นคำถามสำคัญที่ควรมีการศึกษาต่อไป โดยเฉพาะเมื่อมีการนำเอาปัจจัยด้านความแข็งแรงของโครงสร้างเข้ามาเป็นองค์ประกอบหนึ่งในการสร้างหุ่นจำลอง parametric

5.8.2 การผสมผสานความรู้งานวิศวกรรมและสถาปัตยกรรม

การออกแบบตามแนวทางของไฟร โอทโท นั้น เป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ในงานออกแบบสถาปัตยกรรม ซึ่งเมื่อนำมาเทียบเคียงกับระดับของนวัตกรรม 3 ระดับ (Aksamija, 2016) นั้น เป็นระดับสูงสุดที่เป็นระดับของ การเปลี่ยนแปลงวิธีการออกแบบ (Process) ในระดับของการพลิกโฉม (Transformational) ด้วยการนำเสนอวิธีคิด กระบวนการทดลอง ซึ่งนำไปสู่ผลลัพธ์ที่มีความแตกต่างจากสถาปัตยกรรมแบบเดิมที่สถาปนิก วิศวกร ค้นขึ้น แต่เป็นวิธีการบูรณาการความรู้ที่เป็นความสร้างสรรค์ซึ่งสถาปนิก วิศวกรสามารถใช้วิธีการนี้เพื่อสร้างสรรค์ผลงานแบบใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม การบูรณาการความรู้ข้ามศาสตร์ อาจจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ซึ่งต้องอาศัยการทำงานเป็นทีมมากกว่าการทำงานตัวคนเดียว

การทำงานของไฟร โอทโท นั้น มีลักษณะที่ก้าวไปไกลกว่าความรู้ของวิศวกรรมศาสตร์ ณ เวลานั้นมากพอสมควร กล่าวคือ มีแนวคิดเรื่องการผสมผสานการทำงานด้วยความรู้ของสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมโครงสร้างในเวลาเดียวกันตั้งแต่ขั้นตอนแรกของการออกแบบ มิใช่การที่สถาปนิกเป็นผู้ออกแบบรูปทรง แล้วจึงส่งต่อให้วิศวกรเป็นผู้ออกแบบโครงสร้างในขั้นตอนถัดไป การทำงานลักษณะนี้จึงเป็นการหลอมรวมสถาปนิกและวิศวกรเข้ามาเป็นคนเดียวกันดังเช่นอดีตที่ยังไม่มีการแบ่งแยกวิชาชีพอย่างชัดเจน สถาปนิกคือผู้ที่มีความเข้าใจในหลักการออกแบบโครงสร้างด้วย



ภาพที่ 112 ไฟร โอทโท ขณะสร้างและทดลองหุ่นจำลองโครงสร้างหลังคารับแรงดึง ในยุคสมัยที่ยังไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วย การวิเคราะห์แรงกระทำจึงต้องมีการคิดและหาวิธีการ โดยโอทโทแบ่งพื้นที่ผิวออกเป็นตารางหน่วยย่อยขนาดเล็ก เพื่อสังเกตพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ แล้วจึงนำไปสู่การคำนวณทางวิศวกรรม

ที่มา: <https://architectureofthegames.net/museums-and-exhibitions/exhibition-frei-otto-thinking-in-models-zkm-karlsruhe-germany/>

ในส่วนของการวิเคราะห์และคำนวณโครงสร้างในงานออกแบบโครงสร้างเบาของโอทโท นั้น เป็นหน้าที่ของวิศวกรหรือผู้มีความเชี่ยวชาญเรื่องคณิตศาสตร์ ซึ่งในช่วงเวลาของการพัฒนาโครงสร้างเบาของโอทโทในขณะนั้น ยังไม่มีวิธีการคำนวณแรงกระทำที่ผิวโค้งของโครงสร้างที่เป็นระบบ การออกแบบโครงสร้างเบาของโอทโทจึงส่งผลกระทบต่อการพัฒนาคณิตศาสตร์และกลศาสตร์โครงสร้างสมัยใหม่ด้วย

นอกจากนั้น ในวงการวัสดุศาสตร์เองก็มีการพัฒนาวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ที่มีความเบา มาก ๆ เช่น แผ่น Ethylene Tetrafluoroethylene (ETFE film) เพื่อใช้สำหรับเป็นวัสดุในการ ออกแบบโครงสร้างเบาทั้งแบบทั่วไป และโครงสร้างประเภทอัดอากาศ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเบามาก เนื่องจากบางเพียง 3 – 5 ไมครอน แต่มีความแข็งแรงมาก หรือการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเดิม เช่น ผ้าใบ ให้มีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดีขึ้นกว่าในอดีต สามารถครอบคลุมพื้นที่ว่างใช้งานได้ กว้างขึ้น มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นด้วยการเคลือบผิวด้วยสารเคมีหรือวัสดุพิเศษ เป็นต้น

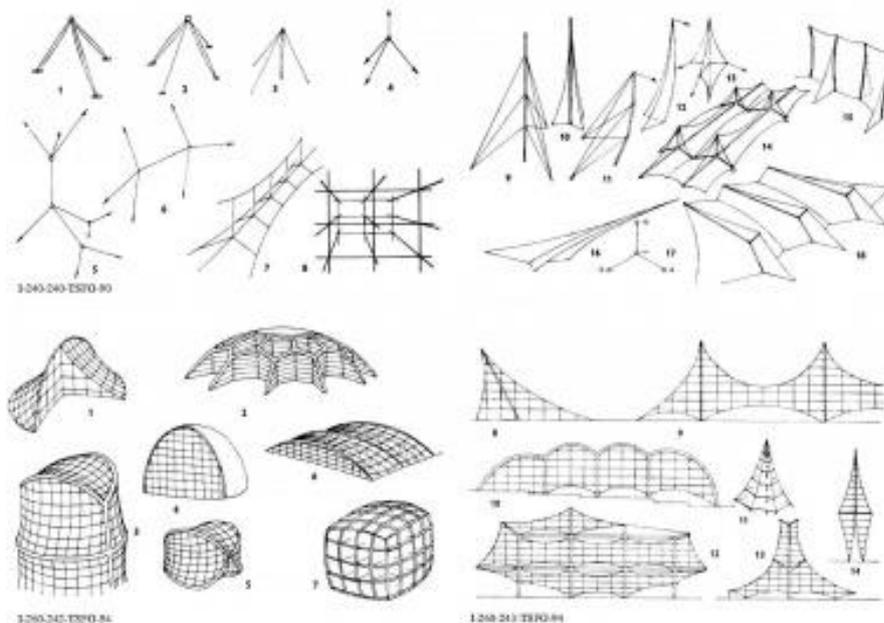
แนวคิดด้านการออกแบบของไฟโร โอทโทที่พยายามบูรณาการการออกแบบรูปทรงบนพื้นฐานของประสิทธิภาพของความสามารถในการรับแรงกระทำนี้ ต่อมาในทางวิศวกรรมศาสตร์มีการใช้กันแพร่หลายมากขึ้น และมีการศึกษาวิจัยเป็นระบบ โดยมักถูกนำไปใช้ในการออกแบบยานพาหนะ เช่น ยานยนต์ เครื่องบิน รถไฟ เป็นต้น เพื่อพัฒนารูปทรงของยานพาหนะเหล่านั้นให้เบาที่สุด แข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน และตอบสนองกับหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) ของรูปทรง

5.8.3 การเรียนรู้และทดลองแบบบูรณาการนักออกแบบกับนักประดิษฐ์

เยอรมนี มีรากฐานแนวคิดทางการศึกษาที่เน้นมาทางด้านวิศวกรรม เห็นได้จากการสร้างแนวคิดทางการศึกษาและการสร้างหลักสูตรสำหรับสถาบันการศึกษาสถาปัตยกรรมขึ้นครั้งแรกคือ สถาบัน Bauakademie ที่เมืองเบอร์ลิน แม้จะศึกษาแบบอย่างการศึกษาสถาปัตยกรรมจากฝรั่งเศส แต่ก็เลือกแนวทางที่แตกต่างจากฝรั่งเศสที่เน้นเรื่องรูปแบบ (style) และงานประณีตศิลป์ แต่เลือกแนวคิดเรื่องการอิงสถาปัตยกรรมอยู่กับวิศวกรรม จึงกลายเป็นเอกลักษณ์ของการศึกษาสถาปัตยกรรมในเยอรมนี

ต่อมาเมื่อปี ค.ศ. 1907 กลุ่มนักออกแบบและเจ้าของฐานการผลิต ต้องการที่จะต่อสู้ทางความคิดและเศรษฐศาสตร์กับกลุ่มการเคลื่อนไหวศิลปะและหัตถกรรม (art and crafts movement) ของสหราชอาณาจักร ซึ่งทำการผลิตสินค้าที่มีฐานจากการออกแบบที่ฟื้นฟูงานศิลปะ หัตถกรรมท้องถิ่นกลับมาใช้เป็นแนวคิดหลักเพื่อต่อต้านกระแสของยุคอุตสาหกรรม กลุ่มสมาพันธ์แรงงานเยอรมัน (Deutscher Werkbund) ก็เลือกแนวทางของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี มากกว่าการหันกลับไปหิยจับเอางานศิลปะหัตถกรรมในแนวดั้งเดิมมาประยุกต์ใช้ และด้วยแนวความคิดนี้เอง ก็ได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลกลางให้สร้างโรงเรียนสอนศิลปะและการออกแบบที่มีแนวทางเฉพาะตัวขึ้นอีก ก็คือสถาบันบาวเฮาส์ (Bauhaus) ขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1919 ซึ่งได้กลายเป็นสถานที่ผลิตนักออกแบบสำหรับโลกสมัยใหม่ที่สร้างแรงกระเพื่อมต่อวงการการศึกษาสถาปัตยกรรมในวงกว้างระดับโลกในเวลาต่อมา

ผนวกกับสถานการณ์ของการตกเป็นเชลยสงครามของไฟโร โอทโท ที่ต้องเผชิญกับการแก้ปัญหาของการออกแบบและก่อสร้างด้วยความจำกัดของวัสดุ ความต้องการแสดงออกซึ่งต่อต้านแนวทางรูปแบบสถาปัตยกรรมอนุรักษ์นิยมของพรคนาซี ที่หันกลับไปหารูปแบบนีโอคลาสสิก ทั้งหมดนี้จึงได้กลายเป็นแรงผลักดันให้ไฟโร โอทโท สามารถสร้างสรรค์แนวคิดและการทดลองเพื่อออกแบบสถาปัตยกรรมในรูปแบบใหม่ โดยมีการผสมผสานกับงานวิศวกรรมโครงสร้างอย่างแนบสนิทเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นผลสำเร็จ



ภาพที่ 113 รูปทรงซึ่งเกิดจากการศึกษาและทดลองของไฟร โอทโท

ที่มา: <https://wiki.ead.pucv.cl/images/thumb/9/96/Otto-01.jpg/400px-Otto-01.jpg>

สิ่งที่เป็นข้อสังเกตหนึ่งคือ ระดับของความคาดเคลื่อน (tolerance) ในโครงสร้างและรูปทรงตามแนวคิดของไฟร โอทโท นั้น จะมีน้อยกว่าการออกแบบโดยการใช้แนวความคิดในการออกแบบที่เป็นปรัชญา หรือแนวคิดในเชิงนามธรรม เหตุเพราะการมีฐานแนวคิดที่สัมพันธ์โดยตรงกับวิศวกรรมโครงสร้าง การสังเกตและทดลองจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงกับวัตถุและรูปทรง ไม่อาศัยการตีความหรือแปลแนวคิดจากสิ่งนามธรรม ใดๆก็ตาม สุนทรียภาพอันเป็นผลลัพธ์นั้น มักจะต้องประเมินบนฐานคิดแบบเหตุผลนิยม ซึ่งต้องอาศัยการใคร่ครวญในเชิงตรรกะ มากกว่าความพึงพอใจระดับปัจเจกบุคคล

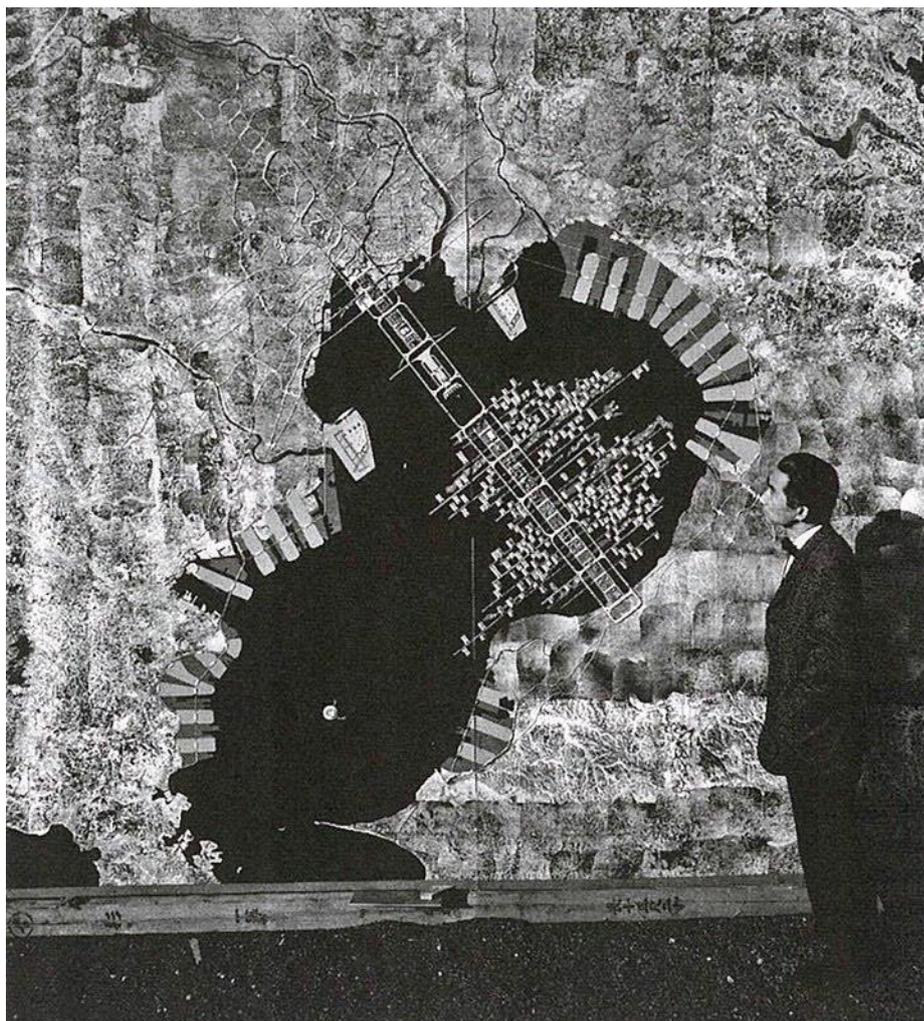
ดังได้กล่าวมานั้น แสดงให้เห็นว่า หากต้องการสร้างนักออกแบบที่มีความสามารถในเชิงเป็นนักพัฒนานวัตกรรมทางการก่อสร้าง ควรสร้างหลักสูตรการเรียนการสอน และให้ประสบการณ์แก่ผู้เรียนตามแนวทางปรัชญาเหตุผลนิยม หรือในเชิงวิศวกรรมศาสตร์

5.8.4 แนวคิดทฤษฎีสถาปัตยกรรมที่เกี่ยวข้อง

การบูรณาการศาสตร์ด้านชีววิทยาเข้ามาเป็นปัจจัยพื้นฐานสำหรับการสร้างแนวคิดในการออกแบบสถาปัตยกรรมนั้น เป็นกระแสด้านความคิดในการออกแบบที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายกลุ่ม นอกเหนือจากกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และนักออกแบบในกลุ่มประเทศยุโรปแล้ว ผู้ศึกษายังพบว่ามีผู้นำเอาชีววิทยามาใช้ในการสร้างทฤษฎีการออกแบบในประเทศแถบเอเชียด้วย โดยเฉพาะ

กลุ่ม Metabolim ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของสถาปนิกหัวก้าวหน้าในช่วงทศวรรษที่ 1960 ซึ่งเป็นเวลาที่ไล่เลี่ยกันกับการศึกษาและทดลองของไฟร โอทโท และทีมงานที่มหาวิทยาลัยชตุทท์การ์ทด้วยเช่นเดียวกัน

กลุ่มสถาปนิก Metabolism ในญี่ปุ่น ประกอบด้วยสถาปนิกคนสำคัญเช่น เคนโซะ ังเงะ (Kenzo Tange) คิโซะ คุโรกาวา (Kisho Kurokawa) ฟุมิฮิโกะ มากิ (Fumihiko Maki) คิโยโนริ คิคุตะเกะ (Kiyonori Kikutake) เป็นต้น



ภาพที่ 114 เคนโซะ ังเงะ กับการออกแบบเมืองโตเกียวซึ่งขยายตัวลงไปทะเล ตามแนวคิด metabolism เมื่อปี ค.ศ. 1960

ที่มา: <http://architecturalmoleskine.blogspot.com/2016/02/japanese-metabolism-as-catalyzer-of.html>

กลุ่ม Metabolism มีความสนใจที่จะพัฒนาเมืองในอุดมคติสำหรับสังคมญี่ปุ่นสมัยใหม่ขึ้น โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบสถาปัตยกรรมและเมืองเป็นเสมือนตั้งองค์พหุที่มีชีวิต อย่างไรก็ตาม

แนวคิดของกลุ่มมิได้เห็นว่าสถาปัตยกรรมนั้นจะต้องมีกระบวนการในการเจริญเติบโตเช่นเดียวกับสิ่งมีชีวิต แต่เป็นกระบวนการในการผสมผสานเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่กลุ่มเห็นว่ามีเหมาะสม ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาของพัฒนาการสังคมเมืองและมนุษย์ เพื่อใช้ในการสร้างสังคมเมืองใหม่ในอุดมคติที่ควรจะเกิดขึ้น ซึ่งมักจะมีแนวโน้มไปในแนวทางของการแก้ไขปัญหาความเสื่อมถอยของสภาวะแวดล้อมโลก (Zhonglie Lin, 2010: 2, 24)

การศึกษาเรื่องการบูรณาการชีววิทยาหรือศาสตร์อื่นเข้ากับสถาปัตยกรรมศาสตร์ จึงเป็นแนวทางการศึกษาที่ยังเปิดกว้างต่อการแสวงหาความรู้ความเข้าใจเพื่อเป็นทางเลือกในการสร้างทฤษฎีการออกแบบหรือแนวทางการออกแบบใหม่ๆต่อไปได้



รายการอ้างอิง

- Aksamija, A. (2016). *Integrating innovation in architecture: Design, methods and technology for progressive practice and research*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Baumgarten, A. G. (1983) *Theoretische Asthetik: Die grundlegenden Abschnitte aus der "Aesthetica" (1750/1758)*. Hamburg, Meiner.
- Beardsley, Monroe C. (1975). *Aesthetics from Classical Greece to the Present*. Alabama, University Alabama Press.
- Brodsky, J. (1988). "Uncommon Visage" in *Poets and Writers Magazine*, March-April, p. 17.
- Burkhardt, B. (1984). *Frei Otto: Schriften und Reden 1951-1983*. Friedr. Wiesbaden: Vieweg & Sohn.
- Burkhardt, B. (2011). *Frei Otto Occupying and Connecting: Thoughts on territories and spheres of influence with particular reference to human settlement*. Stuttgart: Edition Axel Menges.
- Burkhardt, B. (2016). Natural structures – the research of Frei Otto in natural sciences. *International Journal of Space Structures*, 2016, vol.31 (1). 9-15.
- D'Archy, T. (1917). *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dickie, G. (1997). *Introduction to aesthetics: An analytic approach*. New York, Oxford University Press.
- Drew, P. (1976). *Frei Otto – Form and Construction*. London: Crosby, Lackwood, Staples.
- Erfurth, R. and Otto-Kanstinger, C. (2017). *Frei Otto: Die Zukunft hat schon begonnen*. Chemnitz: Herausgegeben von Industrieverein Sachsen 1828 e. V. Chemnitzer Verlag.
- Gänshirt, C. (2007). *Tools for Ideas: An introduction for architectural design*. Basel: Birkhäuser Verlag AG.
- Glaser, L. (1972). *The work of Frei Otto*. New York: The Museum of Modern Art.
- Hammermeister, K. (2002). *The German aesthetic tradition*. Cambridge, Cambridge University Press.

- Hertel, H. (1963). *Struktur, Form, Bewegung*. Mainz: Otto Krausskopf Verlag.
- Kambung, S. (2018). Bionics inspired in architecture: sustainable design approach, *The 7th International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture*, SEGA07 Bangkok, Thailand, May 21-22, 2019.
- Kambung, S. (2019). Comparison study on form-finding experimentation: Antoni Gaudi and Frei Otto, *The 8th International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture*, SEGA08 Bangkok, Thailand, May 27-28, 2019.
- Knox, T. M. (trans). (1975). *Georg Wilhelm Friedrich Hegel, Aesthetics. vol.1*. Oxford, Oxford University Press.
- Leach, N. (2005). Less aesthetics, more ethics in Ray, N. (eds). *Architecture and its Ethical Dilemmas*. Oxon, Routledge.
- Lin, Z. (2010). *Kenzo Tange and Metabolist movement: urban utopias of modern Japan*. New York, Routledge.
- Locher, H. (1999). *Das „Handbuch der Kunstgeschichte“: Die Vermittlung kunsthistorischen Wissens als Anleitung zum ästhetischen Urteil*. In: Reinink W., Stumpel J. (eds) *Memory & Oblivion*. Springer, Dordrecht.
- Louis, S. (1985). “Characteristics and Tendencies of American Architecture,” in *The Inland Architect and Builder*, VI:5 (November 1885), pp. 58–9
- Maria Sogel, J. (2010). *A conversation with Frei Otto*. New York, Princeton Architectural Press.
- Menges, A. (1995). *Frei Otto, Bodo Rasch: Finding Form Towards an Architecture of the Minimal*. Munich: Deutscher Werkbund Bayern.
- Otto, F. (1954). *Das hängende Dach: Gestalt und Struktur*. Berlin: Bauwelt-Verlag.
- Otto, F. (1962). *Zugbeanspruchte Konstruktionen, Band 1: Pneuematische Konstruktionen*. Frankfurt: Verlag Ullstein.
- Otto, F. (1966). *Zugbeanspruchte Konstruktionen band 2: Gestalt, Struktur und Berechnung von Bauten aus Seilen, Netzen und Membranen*. Frankfurt: Verlag Ullstein.
- Otto, F. (1968). *Stromeyer: ein Begriff für leichte Flächentragwerke*. Konstanz: Stadlerdruck.

- Otto, F. (1969). *IL 1: Minimalnetze, Seifenhautversuche, um beliebig viele Punkte in der Ebene oder im Raum mit einem Wegesystem minimaler Länge zu verbinden.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1971). *IL 2: Stadt in der Arktis, Modellstudie für eine Stadt mit künstlichem Klima unter einer glasklaren Hülle.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1971). *IL 3: Biologie und Bauen 1, Kolloquiumsbericht. Das Individuum und sein Milieu. Über die kritische Situation in der wachsenden Sozietät. Tierbauten, Städtebau und biologische Erkenntnis.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1972). *IL 4: Biologie und Bauen 2, Praktische Anwendung der Analogieforschung. Vom Hydroskelett zum Skelettmuskelsystem, Sandwichstrukturen bei Vogelschädeln. Zum Leichtbauprinzip der Organismen, Extremitätenstatik.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1972). *IL 5: Wandelbare Dächer, Historische Zusammenhänge. Dokumentation wandelbarer Konstruktionen, Konstruktionsanalyse mit Grundlagen der Geometrie, der Form und der Bewegungen. Weiterentwicklung wandelbarer Dächer als Massiv- oder Membrankonstruktionen.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1972). *IL 7: Schatten in der Wüste, Projektstudie: Schattendächer für heiße Gebiete. Fragen der Klimakontrolle, konstruktive Probleme, Materialaufwand und Kosten.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1973). *IL 6: Biologie und Bauen 3, Spinnennetze, Konstruktion der Knochen. Biophysikalisches Generalmodell. 3-dimensionale Anaglyphenbilder. Photogrammetrische Vermessung dünner Seifenhäute.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1974). *IL 10: Gitterschalen, Grundlagen und Methoden zur Formfindung von Gitterschalen. Vom Hängemodell zur Tragkonstruktion. Architektonische Möglichkeiten und Ansätze.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.

- Otto, F. (1975). *IL 12: Wandelbare Pneus, Anregungen und Beispiele von wandelbaren Pneus. Pneukatalog. Studien zur Formbildung von Pneus und Diatomeenschalen. Leichtbauarchitektur in der Praxis: Der europäische Zeltbau heute.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1975). *IL 14: Anpassungsfähig Bauen, Kolloquiumsbericht. Aspekte der Geschichte, Politik, Biologie, Medizin, Architektur und des Städtebaus.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1975). *IL 8: Netze in Natur und Technik, Übersicht und Ordnung der technischen Seilkonstruktionen. Fasern und Seile. Maschenstrukturen der Netze. Seilverbindungen. Bauen mit Netzen. Insekten- und Spinnennetze..* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1976). *IL 16: Zelte, Ein Blick in die Zeltbaupraxis - Zeltkonstruktionen kleiner und größter Spannweiten. eine Würdigung des Werkes von Peter Stromeyer.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1977). *IL 9: Pneus in Natur und Technik, Interdisziplinäre Forschungsarbeit von Biologen und dem IL. Darstellung der Formbildungsgesetze des Konstruktionssystem Pneu mit Beispielen aus Natur und Technik. Das Konstruktionssystem Pneu ist die wesentliche Grundlage der Formwelt der lebenden Natur.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1978). *IL 11: Leichtbau und Energietechnik, Projekte und Entwicklungen für Kühltürme, Wasserbauten, Speicher, Klärbehälter, Energiegewinnung mit Sonne, Wind und Wasser, Klima im Innenraum.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1978). *IL 13: Multihalle Mannheim, Die 7400 qm große Gitterschale der Bundesgartenschau Mannheim. Von den Wettbewerbsskizzen bis zur Fertigstellung.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1978). *IL 17: The Work of Frei Otto and his Teams, Ausstellungskatalog des Museums of Modern Art New York, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Auslandsbeziehungen Stuttgart.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.

- Otto, F. (1979). *IL 19: Wachsende und sich teilende Pneus, Pneumatische Konstruktionen in Natur und Technik. Entstehungsprozesse, Methoden der Formveränderung.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1979). *IL 20: Aufgaben, Probleme und Fragen in Forschung und Praxis in Weiterentwicklung und Anwendung des Leichtbaus.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1979). *IL 21: Form Kraft Masse 1 – Grundlagen, Komplexe Zusammenhänge zwischen Form, Masse und Effektivität von Konstruktionen aus Natur und Technik mit einem Beitrag zum Thema Ästhetik.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1980). *IL 29: Die Zeltstädte des Hadsch, Die Entstehung des Hadsch, der Pilgerfahrt nach Mekka, sein heutiger Ablauf und seine städtebaulichen Probleme. Betrachtung des Einzelzeltes, der Zeltstadt und ihrer Organisation.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1981). *IL 27: Natürlich Bauen, Beiträge zum gleichnamigen Symposium im Herbst 1979 am IL. Themen: Natur und Gesellschaft, Selbstbau, natürliche Konstruktionen, organisches und ökologisches Bauen.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1982). *Natürliche Konstruktion: Formen und Konstruktionen in Natur und Technik und Prozesse ihrer Entstehung.* Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt.
- Otto, F. (1983). *IL 15: Lufthallenhandbuch, Entwurf und Konstruktion, Zuschnitt, Berechnung, Herstellung und Konfektion von Lufthallen. Materialien und Vorschriften.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1983). *IL 32: Leichtbau in Architektur und Natur, Ausstellung „Natürliche Konstruktionen“ im Museum A.W. Schussew in Moskau 1983. Forschungen und Projekte der Arbeitsgruppen Biologie und Bauen in BRD und UDSSR.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1984). *IL 30: Vela, Toldos, Schattenzelte, Studien und Überlegungen zu römischen Theater-Vela. Die Sonnensegel (Toldos) von Sevilla. Schinkels Blechzelte und Nachfolgebauten.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.

- Otto, F. (1984). *IL 36: Subjektive Standorte, Subjektive Standorte in Baukunst und Naturwissenschaft. Kolloquiumsbericht zum 20-jährigen Bestehen des IL.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1985). *IL 28: Diatomeen 1, Schalen in Natur und Technik. Morphogenetische Analyse und Merkmalsynthese in Diatomeen-Schalen von J.-G. Helmcke. Theoretische und experimentelle Grundlagen. Prozesse der Formentstehung. Schalenmorphogenese.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1986). *IL 31: Bambus, Bambus als Baustoff, seine traditionelle Anwendung in Südostasien (Neuherausgabe der Dissertation von Klaus Dunkelberg). Bauen mit pflanzlichen Stäben, neue Bauformen, Konstruktion und Details.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1988). *IL 18: Seifenblasen, Experimente mit Flüssigkeitslamellen in Wissenschaft, Architektur und Technik. Minimalwege, Minimalflächen, Formfindungsmodelle für Zelte, Netze, Lufthallen.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1988). *IL 22: Form Kraft Masse 2 – Form, Vorschlag zur Entwicklung einer Methode zur Ordnung und Beschreibung von Formen.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1988). *Gestaltwerdung: Zur Formentstehung in Natur, Technik und Baukunst.* Köln: Verlag Rudolf Müller.
- Otto, F. (1989). *IL 34: Das Modell, Antoni Gaudis Hängemodell und seine Rekonstruktion. Neue Erkenntnisse zum Entwurf für die Kirche der Colonia Güel (Dissertation von Jos Tomlow).* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1990). *IL 33 Radiolarien, Schalen in Natur und Technik - Die Radiolarien im stereoskopischen Bild von J.-G. Helmcke. Prozesse der Formbildung von K. Bach.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1992). *IL 23: Form Kraft Masse 3 – Konstruktion, Einteilung und Ordnung von Konstruktionen nach ihren technischen und konstruktiven Merkmalen.* Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.

- Otto, F. (1992). *IL 39: Ungeplante Siedlungen, Charakteristische Merkmale - Wegesysteme, Flächenteilung, Einflüsse von Selbstorganisationsprozessen auf die Entwicklung von Siedlungsstrukturen. Vergleiche mit selbstbildenden Strukturen in der Natur (Dissertation von Eda Schaur)*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1994). *IL 37: Alte Baumeister, Frei Otto: Was könnten die alten Baumeister erfunden haben ? Ein Beitrag zur Geschichte des Konstruierens*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1995). *IL 35: Pneu und Knochen, Das Konstruktionsprinzip Pneu in der lebenden Natur: weiche Pneus, feste Pneus, Schalentiere, Knochen*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1995). *IL 41 Intelligent Bauen, Aspekte einer anderen Baukultur. Vor welchen neuen Aufgaben stehen Planer, Architekten und Ingenieure angesichts der wachsenden globalen Probleme*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1996). *IL 24: Form Kraft Masse 4 – Prinzip Leichtbau, Aufwand und Optimierung von Bauelementen und Konstruktionen. Die Bic-Lambda-Methode. Energiesysteme*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1996). *IL 25: Form Kraft Masse 5 – Experimente, Experimente zur Abhängigkeit von Form, Kraft und Masse. Selbstbildende Prozesse in Biologie und Bauen. Formfindung und Modellmethoden (Dissertation v. Siegfried Gaß)*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F. (1996). *IL 26: Natur und Bauen, Internationaler Jugendwettbewerb in Zusammenarbeit mit dem Institut für Auslandsbeziehungen Stuttgart. Bilder von 810 Kindern, eingesandt aus 24 Ländern. Erläuterungen aus Sicht von Architekten, Ökologen und Künstlern*. Stuttgart: Universität Stuttgart Verlag: Karl Krämer.
- Otto, F., Helmcke, J.G., Burkhardt, B. (1978). *Natürliche Konstruktionen = Constructions naturelles = Natural constructions. Bauen + Wohnen: internationale Zeitschrift 32 (4). 150-152.*

- Peteinarelis, A. (2016). Frei Otto's contribution -legacy to parametric design and material computation. *Architecture In-Play 2016 International Conference proceeding, Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL)*. July 11th-12th 2016.
- Pluhar, W. S. (trans). (1987). *Immanuel Kant: Critique of judgement*. Indianapolis, Hackett publishing company.
- Polio, V. in Morgan, M. H. (trans). (1914). *The ten books on architecture*. New York, Dover Publications.
- Roland, C. (1970). *Frei Otto: Tension structures*. London: Longman group Limited.
- Schaur, E. (2016). Forms, their aspects and their formation processes in architecture and nature. *International Journal of Space Structures, 2016, vol.31 (1)*. 31-42.
- Schumacher, P. (2009). Parametricism: A new global style of architecture and urban design. *Architectural Design, Digital Cities* (July August 2009 Vol.79, No.4). 14-23.
- Scruton, R. (1976). *The aesthetics of architecture*. London: Methuen & Co.
- Sobek, W. (2016). Ultra-lightweight construction. *International Journal of Space Structures, 2016, vol.31 (1)*. 74-80.
- Yuan, P., Menges, A., Leach N. (2017). *Digital fabrication*. Tongji: Tongji University Press.
- Zangwill, N. (2007). *Aesthetic creation*. Oxford, Oxford University Press.
- Zuk, W. and Clark, R. H. (1970). *Kinetic architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Wood, D. W. (2012). *Civil engineering: A very short introduction*. Oxford: Oxford University Press.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

บัญชีรวบรวมผลงานการออกแบบของไฟโร โอทโท (เรียงตามปี)

- 1946 สะพานข้ามแม่น้ำออยเรอ (Eure) เมืองชาร์ตร์ (Chartres) ประเทศฝรั่งเศส
- 1951 สะพานคอนกรีตอัดแรง อ่าวซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา
- 1951 โครงการประกวดออกแบบสำนักงานธนาคาร Berliner Bank เยอรมนี
- 1951 อาคารแสดงดนตรีที่ไลท์เซนเซ (Leitzensee) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1951 บ้านพักอาศัยโมรเส็ก (Mrosek residence) เมืองเบรเมนฮาเฟิน (Bremenhaven) เยอรมนี
- 1952 อาคารหอประชุม โรงเรียนประถม (Grammar school) เบอร์ลิน-ไรน์เคนด์อร์ฟ (Berlin-Reinikendorf) เยอรมนี
- 1953 โครงการประกวดออกแบบวิทยาลัยศาสนา (Parochial Collage) เบอร์ลิน-เซห์เลนดอร์ฟ (Berlin-Zehlendorf) เยอรมนี
- 1953 โบสถ์โครงสร้างเบา ออฟริกา
- 1953 แนวความคิดเมืองโครงสร้างเบาเพื่อควบคุมสภาวะอากาศ
- 1954 หลังคาคลุมโรงละครกลางแจ้งคิลเลสแบร์ก (Open-air theatre in Killesberg) ชตุทท์การ์ท
- 1954 โครงการที่พักอาศัยรวม มุลนิชชานด์ร่า (Sandra-Stiftung) ชานเมืองเบอร์ลิน เยอรมนี
- 1954 เต็นท์รูปทรงคลื่นขนาน (parallel-wave tent)
- 1955 ศาลาดนตรี (Music pavilion) ในงานนิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองคาสเซิล เยอรมนี
- 1955 หลังคาทรงเห็ด (Three mushrooms) ในงานนิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองคาสเซิล เยอรมนี
- 1955 หลังคาคลุมสร้างเต็นท์รูปปีกผีเสื้อ ในงานนิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองคาสเซิล เยอรมนี
- 1955 หลังคาคลุมสันเขื่อนโกเอชเชิน (Goeschen Alp dam) สวิตเซอร์แลนด์
- 1955 โครงการประกวดออกแบบโบสถ์ สู่มาตุภูมิ (Zur Heimat) เบอร์ลิน-เซห์เลนดอร์ฟ (Berlin-Zehlendorf) เยอรมนี
- 1956 โครงสร้างเต็นท์สำหรับศาลาดนตรีแบบเคลื่อนที่ เบรเมน เยอรมนี
- 1956 ส่วนหลังคาโถงต้อนรับ (canopy) โรงแรมเซลิคโฮฟ (Selighof) บาเดน-บาเดน (Baden-Baden) เยอรมนี
- 1957 ชุ่มประตูทางเข้านิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองโคตลยุงน์ เยอรมนี
- 1957 เวก์เต็นรำ นิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองโคตลยุงน์ เยอรมนี
- 1957 เต็นท์ยอดแหลม นิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองโคตลยุงน์ เยอรมนี

- 1957 เต็มที่ยอดมน นิทรรศการสวนแห่งชาติ เมืองโคตลัญจน์ เยอรมนี
- 1957 โครงสร้างเต็สำหรับนิทรรศการ เมืองแห่งอนาคต (Die Stadt von Morgen) ในงานจัดแสดงนวัตกรรมการก่อสร้างนานาชาติ (Interbau) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1957 โครงสร้างผ้าใบสำหรับนิทรรศการพิเศษ ในงานจัดแสดงนวัตกรรมการก่อสร้างนานาชาติ (Interbau) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1957 อาคารศูนย์อาหาร ในงานจัดแสดงนวัตกรรมการก่อสร้างนานาชาติ (Interbau) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1957 หลังคาคลุมเวทีออเคสตรา ในงานจัดแสดงนวัตกรรมการก่อสร้างนานาชาติ (Interbau) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1957 อาคารคาเฟ่ ณ พระราชวังเบลเลเว (Schloss Bellevue) ในงานจัดแสดงนวัตกรรมการก่อสร้างนานาชาติ (Interbau) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1957 อาคารจัดแสดงนิทรรศการสำหรับบริษัทโตรเมเยอร์ (Stromeyer) ในงานจัดแสดงสินค้าสวิส (Swiss Mustermesse) เมืองบาเซล สวิตเซอร์แลนด์
- 1957 โครงการประกวดออกแบบ หอประชุมเทศบาล เมืองเบรเมน เยอรมนี
- 1958 โครงสร้างแรงดึงรูปรม ในงานจัดแสดงสวนแห่งชาติ เมืองซาร์บรึคเคิน (Saarbrücken) เยอรมนี
- 1958 สตูดิโองานประติมากรรมของ เพาวล์ เดียร์กเคส (Paul Dierkes) เมืองทิจิโน (Ticino)
- 1958 โรงละครเคลื่อนที่สำหรับงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ (world expo) เมืองบรัสเซลส์ (Brussel)
- 1958 หลังคาคลุมสนามสเก็ต เพาว์ลินเนอร์ มาร์ช โรลเลอร์-สเก็ต (Pauliner Marsch Roller-Skating Rink) เมืองเบรเมน เยอรมนี
- 1958 อาคารจัดแสดงในงานหนังสือ เซนต์หลุยส์ (St. Louis) สหรัฐอเมริกา
- 1958 อาคารโรงเรือนต้นไม้ขนาดใหญ่ ในสวนพฤกษศาสตร์ เซนต์หลุยส์ (St. Louis) สหรัฐอเมริกา
- 1958 อาคารสวนนก สวนสัตว์เซนต์หลุยส์ (St. Louis) สหรัฐอเมริกา
- 1958 สถาบันพัฒนาการออกแบบโครงสร้างเบา ทอยร์กชไตน์เวก (Tuerksteinweg) เบอร์ลิน-เซย์เลนดอร์ฟ (Berlin-Zehlendorf) เยอรมนี
- 1959 โครงการออกแบบอาคารสูงที่พักอาศัยรวม เซ็นทรัล ปาร์ค (Central park) นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา
- 1959 โครงการศึกษาและออกแบบอาคารพักอาศัยจากวัสดุถุทราย
- 1959 โครงการออกแบบศาลาคลุมแปลงดอกไม้สำหรับการจัดแสดงในเมืองรอตเทอร์ดัม (Rotterdam) เนเธอร์แลนด์
- 1960 โบสถ์โปรเตสแตนต์ เบอร์ลิน-เชินโนว (Berlin-Schönow) เยอรมนี

- 1960 หลังคาผ้าใบสำหรับศิวาลัย อาคารไอบีเอ็ม (IBM building) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1960 โครงการประกวดออกแบบสถานีบริการน้ำมัน AVIA petrol station
- 1960 หลังคาสำหรับโรงละครเปิด (open-air theatre) นีมีจเวเกน (Nijmegen) เนเธอร์แลนด์
- 1960 โครงการออกแบบอาคารที่พักสำหรับนักบวชนิกายลูเธอรัน เบอร์ลิน-ชินแบร์ก (Berlin-Schönberg) เยอรมนี
- 1960 โครงการประกวดออกแบบศูนย์เครือข่ายสัญญาณโทรทัศน์ SFB (โครงสร้างหลังคาอัดอากาศ)
- 1961 โครงการออกแบบหลังคาคลุมท่าเรือเบรเมน (Bremen) เยอรมนี
- 1961 แนวความคิดโครงการที่พักอาศัยแนวตั้ง (โครงสร้างรับแรงดึง)
- 1961 โครงการประกวดออกแบบสระว่ายน้ำ เซคส์ชลิงฟอร์เต้ (Sechslingforte) ฮัมบูร์ก (Hamburg) เยอรมนี
- 1962 หลังคาโดมไม้ สำหรับงานจัดแสดงการก่อสร้าง ประจำปี 1962 ณ เมือง เอสเซน (Essen) เยอรมนี
- 1962 ต้นแบบหลังคาโดมอัดอากาศ งานจัดแสดงการก่อสร้าง ประจำปี 1962 ณ เมือง เอสเซน (Essen) เยอรมนี
- 1962 โครงการประกวดออกแบบโบสถ์โปรเตสแตนต์ธาเบีย (Tabia) เบอร์ลิน—นอยเคิลล์ (Berlin-Neukölln) เยอรมนี
- 1963 หอระฆังโบสถ์โปรเตสแตนต์ เบอร์ลิน-ชินโนว์ (Berlin-Schönow) เยอรมนี
- 1963 โบสถ์โปรเตสแตนต์แห่งเซ็นต์ลูค (St.Luke) เบรเมน-โกรลันด์ (Bremen-Grolland) เยอรมนี
- 1963 หลังคาโครงสร้างผ้าใบคลุมทางเดินในงานนิทรรศการสวนแห่งชาติประจำปี 1963 ฮัมบูร์ก เยอรมนี
- 1963 ศาลาผ้าใบสี่แฉก (four radial-wave pavilions) งานนิทรรศการสวนแห่งชาติประจำปี 1963 ฮัมบูร์ก เยอรมนี
- 1963 โถงหลังคาผ้าใบ งานนิทรรศการสวนแห่งชาติประจำปี 1963 ฮัมบูร์ก เยอรมนี
- 1963 หลังคาผ้าใบสำหรับสนามสเก็ตน้ำแข็ง ดอร์ทมุนท์ (Dortmund) เยอรมนี
- 1963 หลังคาโรงเรือนต้นไม้มอบปรับได้ (convertible greenhouse) ชตุทท์การ์ท เยอรมนี
- 1963 ส่วนต่อเติมและหลังคาคลุมโรงละครแบบเปิด วุนซิดเดล (Wunsiedel) เยอรมนี
- 1963 อาคารหอประชุมใหญ่ มหาวิทยาลัยชตุทท์การ์ท เยอรมนี
- 1964 โครงสร้างหลังคา 'Neige et Rocs' ในงานจัดแสดงสินค้าสวิส (Swiss regional expo 1964) เมืองโลซานน์ สวิตเซอร์แลนด์
- 1964 หลังคาคลุมโรงละครแบบเปิด เฮพเพินไฮม์ (Heppenheim) เยอรมนี

- 1964 โบสถ์โปรเตสแตนต์ ซตุทท์การ์ท-โซนเนนแบร์ก (Stuttgart-Sonnenberg) เยอรมนี
- 1965 หลังคาปรับได้สำหรับระเบียงอาสิโน เมืองคานส์ (Cannes) ฝรั่งเศส
- 1965 โครงการศึกษาและออกแบบหลังคาคลุมพื้นที่ก่อสร้างขนาดใหญ่ ลอนดอน สหราชอาณาจักร
- 1965 โครงการประกวดออกแบบศูนย์ชุมชนโปรเตสแตนต์ บริทซ์-บึคโคว์รูโดว์ (Britz-Buckowrudow) เบอร์ลิน-โกรปิอัสตัดท์ (Berlin-Gropiusstadt) เยอรมนี
- 1965 โครงการศึกษาและออกแบบอาคารชั่วคราวสำหรับสถาบันการแพทย์เมืองอูล์ม (Ulm) เยอรมนี
- 1965 ส่วนต่อเติมอาคารโถงแสดงสินค้าไรน์-ไมน์ (Rhein-Main-Halle) วีสบาเดิน (Wiesbaden) เยอรมนี
- 1965 ต้นแบบเต็นท์พักอาศัย “Quadratwelle Stromeyer 66”
- 1966 สระว่ายน้ำและหลังคาคลุมสำหรับบ้านพักอาศัย ดร.เกทเยน (Dr. Gätjen) เบรเมน เยอรมนี
- 1966 สระว่ายน้ำและหลังคาคลุม เมืองบอร์คัม (Borkum) เยอรมนี
- 1966 เต็นท์ในสวน ดร.ฟาร์ (Dr. Fahr) ซตุทท์การ์ท
- 1966 สถานีวิจัยไฟฟ้าแรงสูง บริษัท เฟลเทน และ กุสโลมเม (Felten und Guillaume A.G.) โคโลญจน์ (Cologne) เยอรมนี
- 1966 โครงการประกวดออกแบบศูนย์ประชุมและโรงแรม เมืองริยาดห์ (Riyadh) ซาอุดีอาระเบีย
- 1966 โครงการศึกษาและออกแบบศาลาคลุมสนามสเก็ตน้ำแข็ง เมืองดาวอส (Davos) สวิตเซอร์แลนด์
- 1967 สถาบันการออกแบบโครงสร้างเบา ซตุทท์การ์ท เยอรมนี
- 1967 ศาลาเยอรมัน ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ เมืองมอนทรีออล (Montreal) แคนาดา
- 1967 หลังคาปรับได้ สำหรับคลุมสระว่ายน้ำ บูเลอวาร์ด คาร์โนต์ (Boulevard Carnot) ปารีส ฝรั่งเศส
- 1967 หลังคาคลุมสนามฮ็อกกี้น้ำแข็ง เมืองมอนทรีออล แคนาดา
- 1967 โครงการออกแบบศาลาอินเดีย (Indian pavilion) สำหรับงานจัดแสดงสินค้านานาชาติ เมืองโอซาก้า ญี่ปุ่น
- 1967 โครงการออกแบบต้นแบบสระว่ายน้ำเพื่อเมืองขนาดกลางและเล็ก สำหรับทุกสภาพอากาศ
- 1967 โครงการประกวดออกแบบหลังคาคลุมทางเดินบนถนนเซอเกอ (Sögestraße) เบรเมน เยอรมนี

- 1967-1968 โครงการออกแบบหลังคาคลุมอัมเจอร์รี่หลัก เมืองเกลเซนเคียร์เชิน (Gelsenkirchen) เยอรมนี
- 1968 บ้านพักอาศัยและสตูดิโอ วาร์มบรอนน์ (Warmbronn) ซตุท์ทการ์ท เยอรมนี
- 1968 หลังคาคลุมโรงละครเปิด ณ อารามโบราณ เมืองบาด แฮร์สเฟลด์ (Bad Hersfeld) เยอรมนี
- 1968 โครงการออกแบบศาลาในสวน เรย์แบร์เกอ พาร์ค (Rehberge Park) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1969 ศูนย์ประชุมและโรงแรม เมืองเมกกะ (Mecca) ซาอุดีอาระเบีย
- 1969-1972 หลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิก มิวนิค เยอรมนี
- 1969 โครงการประกวดออกแบบศูนย์กีฬา คูเวต
- 1969 โครงการประกวดออกแบบสวนน้ำ เมืองเล็มโก้ (Lemgo) เยอรมนี
- 1969 โครงการออกแบบหลังคาสำหรับปล่องแสง ศูนย์ธุรกิจโฟรัม สเตกลิทซ์ (Forum Steglitz) เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1969 โครงการออกแบบสะพานคนเดิน เบอร์ลิน-วิลเมอร์สดอร์ฟ (Berlin-Wilmersdorf) เยอรมนี
- 1969 โครงการประกวดออกแบบอาคารเอนกประสงค์ เทอเร่-เพลน ดู พอร์ตีเออร์ (Terre-Plein du Portier) โมนาโก
- 1969 โครงการออกแบบสนามแข่งขันจักรยาน ซตุท์ทการ์ท เยอรมนี
- 1969 โครงการประกวดออกแบบสระว่ายน้ำ ฝรั่งเศส
- 1970 โบสถ์โปรเตสแตนต์ บอนโฮเฟอร์ พารีช (Bonhoffer Parish) เบรเมน-ฮุชติง (Bremen-Huchting) เยอรมนี
- 1970 หลังคาคลุมเวที ณ อารามโบราณ เมืองบาด แฮร์สเฟลด์ (Bad Hersfeld) เยอรมนี
- 1970 โครงการศึกษาและออกแบบ มัลติมีเดีย สเตเดียม (Multimedia stadium) มิวนิค เยอรมนี
- 1970 โครงการประกวดออกแบบอัมเจอร์รี่และหลังคาคลุมสนามกีฬาโอลิมปิก เบอร์ลิน เยอรมนี
- 1970 โครงการประกวดออกแบบอัมเจอร์รี่และหลังคาคลุมสนามกีฬา เนกคาร์ สเตเดียม (Neckar stadium) ซตุท์ทการ์ท เยอรมนี
- 1971 โครงสร้างหลังคาร่มขนาดใหญ่ในงานจัดแสดงสวนแห่งชาติ เมืองโคโลญจน์ เยอรมนี
- 1971 หลังคาคลุมสนามสเก็ตน้ำแข็ง คอนฟลันส์ โฮโนไรน์ (Conflans-Ste. Honorine) ฝรั่งเศส
- 1971 หลังคาคลุมสระว่ายน้ำออล-เวเธอร์ (All-weather) เรเกนส์บูร์ก เยอรมนี
- 1971 โครงการศึกษาและออกแบบเมืองลอยน้ำแห่งอนาคต City in the Arctic
- 1972 โครงการศึกษาและออกแบบเมืองทะเลทราย Shadow in the desert
- 1972-1974 ศาลาอเนกประสงค์ Multihalle สำหรับงานสวนแห่งชาติ 1975 เมืองมันน์ไฮม์ (Mannheim) เยอรมนี

- 1973 โครงการศูนย์กีฬา Snow hill sport centre เมืองเบอร์มิงแฮม (Birmingham) สหราชอาณาจักร
- 1973 ศูนย์ศิลปะ อาบิเดียน (Abidjan) ไอเวอรี โคสต์ (Ivory Coast)
- 1973 ต้นแบบโครงสร้างเต็นท์พักอาศัย Sarabhai tent project เมืองอาห์มัดดาบาด (Ahmedabad) อินเดีย
- 1973 โครงการออกแบบสวนนก ลุดวิกส์บวร์ก (Ludwigsburg) เยอรมนี
- 1974 โครงการประกวดออกแบบที่พักอาศัยสำหรับผู้แสวงบุญ ชาอูดีอาระเบีย
- 1974 โครงการออกแบบเวทีและหลังคาคลุมสำหรับโรงละครกลางแจ้ง สการ์โบรธ (Scarborough) สหราชอาณาจักร
- 1974 โครงการออกแบบศูนย์ศิลปะและนันทนาการโมนาร์โต ฮับ (The Monarto hub arts and recreation centre) ออสเตรเลีย
- 1974 โครงการออกแบบหอหล่อเย็น (cooling tower) สำหรับสถานีพลังงานนิวเคลียร์
- 1974 หลังคาตาข่ายคลุมสนามเทนนิส เมืองอัลฮัมมาต (Al-Hammamat) ตูนิเซีย
- 1974 โครงการหลังคาคลุมพื้นที่ประวัติศาสตร์ กรุงวอชิงตัน ดี.ซี. สหรัฐอเมริกา
- 1974 ศูนย์กีฬา วังสุลต่าน โอมาน
- 1974 โครงการประกวดออกแบบอาคารที่อาบน้ำสาธารณะ เมืองบาเดน-บาเดน (Baden-Baden) เยอรมนี
- 1974-1976 โครงการออกแบบศูนย์ราชการ KOCOMAS ชาอูดีอาระเบีย
- 1975 โครงการออกแบบโถงต้อนรับ สำหรับสถานี เบรมิน เยอรมนี
- 1975 โครงการออกแบบโถงต้อนรับ สนามสเก็ตน้ำแข็ง La Piazza ปารีส ฝรั่งเศส
- 1975 โครงการออกแบบห้างสรรพสินค้า โวลฟ์เวอร์ตัน (Wolverton Agora) สหราชอาณาจักร
- 1975 โครงสร้างเต็นท์ในงานเฉลิมฉลองสมเด็จพระราชินีอลิซาเบธที่ 2 อะเบอร์ดีน (Aberdeen) สก็อตแลนด์
- 1975 โครงการศึกษาและออกแบบโครงสร้างรับแรงดึงไฮดรอลิก (hydraulically tensioned hoses)
- 1976-1977 โครงการออกแบบสนามสเก็ตน้ำแข็งสำหรับชุมชนเวล (Vail) โคโลราโด (Colorado) สหรัฐอเมริกา
- 1977 หลังคาคลุมพื้นที่โรงละครกลางแจ้ง ฮันโนเฟอร์-แฮร์เรนฮาวเซิน (Hannover-Herrenhausen) เยอรมนี
- 1977 โครงสร้างหลังคาร่มปรับได้ สำหรับการทัวร์คอนเสิร์ตในสหรัฐอเมริกาของวงดนตรี พิงค์ ฟลอยด์ (Pink Floyd)
- 1978 โครงการประกวดออกแบบหลังคาคลุมสนามกีฬาเบิบลิงเงน (Böblingen) เยอรมนี
- 1978-1980 สวนนก ในสวนสัตว์มิวนิค เยอรมนี

- 1979 การศึกษาและออกแบบต้นแบบเรือเหาะ Airfish
- 1979-1981 ศูนย์กีฬา เมืองเจดดาห์ (Jeddah) ซาอุดีอาระเบีย
- 1980 โครงการออกแบบบ้านพักชนบท อิตาลี
- 1980 โครงการออกแบบศูนย์ชุมชนกัทลินเบิร์ก (Gatlinburg) เทนเนสซี (Tennessee) สหรัฐอเมริกา
- 1980 สมาคมนักการทูต (diplomatic club) ซาอุดีอาระเบีย
- 1981 ชุมชนเต็นท์ภูเขา (mountain tents) เมืองมูนา (Muna) ใกล้ๆกับเมกกะ ซาอุดีอาระเบีย
- 1981 โครงการประกวดออกแบบศูนย์กรีธา เมืองแฟรงก์เฟิร์ต อัม ไมน์ (Frankfurt am Main) เยอรมนี
- 1981 โครงการประกวดออกแบบศาลาจัดแสดงนิทรรศการ เมืองแฟรงก์เฟิร์ต อัม ไมน์ (Frankfurt am Main) เยอรมนี
- 1981 โครงการออกแบบชุมชนต้นแบบอือโค เฮาส์ เบร์ลิน-ครอยซ์แบร์ก (Berlin-Kreuzberg) เยอรมนี
- 1981 โครงการออกแบบชุมชนต้นแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมอือโค เฮาส์ เบร์ลิน-ครอยซ์แบร์ก (Berlin-Kreuzberg) เยอรมนี
- 1981 โครงการออกแบบชุมชนต้นแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมอือโค เฮาส์ เบร์ลิน-เทียร์ การ์เทน (Berlin-Tier Garten) เยอรมนี
- 1981 โครงการศึกษาและออกแบบเมืองใหม่ 58 องศา เหนือ (58 North) แคนาดา
- 1982 โครงการศึกษาและออกแบบหลังคาคลุมโรงละครกลางแจ้ง เมืองเทรียร์ (Trier) เยอรมนี
- 1983 โครงการออกแบบพิพิธภัณฑ์การบิน เริน (Rhön) เยอรมนี
- 1984 โครงการประกวดออกแบบกระทรวงการต่างประเทศ เมืองรียาดส์ ซาอุดีอาระเบีย
- 1985-1988 สถาบันป่าไม้ฮุก พาร์ค (Hooke Park forest school) ดอร์เซต (Dorset) สหราชอาณาจักร
- 1986-1988 อาคารนิทรรศการอุตสาหกรรม บริษัทผลิตเครื่องเรือนวิลคาร์ทัน (Wilkhahn) บาด มินด์เร่ (Bad Münder) เยอรมนี
- 1987 โครงการออกแบบหลังคาคลุมลานโบสถ์ เมืองฟอยทซ์วังเงน (Feuchtwangen) เยอรมนี
- 1987 โครงการออกแบบอาคารจัดแสดงนิทรรศการบนเกาะ นีลท์เย ยานส์ (Neeltje Jans) เนเธอร์แลนด์
- 1987-1988 โครงการออกแบบสิ่งปลูกสร้างและสภาพแวดล้อมเพื่อการป้องกันเสียงบนถนนเซงเคนดอร์ฟ (Schenkendorfstraße) มิวนิค เยอรมนี
- 1988 อาคารสัญลักษณ์ (Symbol tower) ในงานนิทรรศการเส้นทางสายไหม เมืองนารา (Nara) ญี่ปุ่น

- 1988-1989 โครงการประกวดออกแบบโรงอุปรากร คอมพ์ตัน เวอร์นีย์ (Compton Verney) ไกล์ เบอริงแฮม สหราชอาณาจักร
- 1988-1989 ศาสนาสันเคล็อนที่ เมืองบัมแบร์ก (Bamberg) เยอรมนี
- 1989 โครงการออกแบบสวนและหลังคาคลุม โรงเรียนประถมเกอร์ลิงเงน (Gerlingen) ไกล์ กับชตุท์การ์ท เยอรมนี
- 1989 โครงการออกแบบหลังคาคลุมพระราชวังอิมพีเรียล เมืองเกิลน์ฮาวเซิน (Gelnhausen) เยอรมนี
- 1989 โครงการออกแบบหลังคาคลุมโบราณสถาน โบสถ์ เซนต์ นิโคลัส เมืองฮัมบูร์ก เยอรมนี
- 1990 โครงการประกวดออกแบบศาลาเยอรมัน ในงานจัดแสดงสินค้าดลก ประจำปี 1992 เมืองเซวิลล์ (Seville) สเปน
- 1990-1991 โครงการออกแบบเมืองต้นแบบ Atlantis-Mariposa สเปน
- 1991 โครงการประกวดออกแบบนานาชาติ สำนักงานใหญ่ธนาคารคอมเมอร์ชแบงก์ (Commerzbank) แฟรงก์เฟิร์ต อัม ไมน์ เยอรมนี
- 1991 ข้อเสนอโครงการออกแบบศูนย์กลางสำนักงานใหญ่เดมเลอร์-เบนซ์ ชตุท์การ์ท เยอรมนี
- 1991 โครงการออกแบบส่วนต่อเติม มหาวิทยาลัยอุล์ม (Fachhochschule Ulm) เยอรมนี
- 1991-1992 ข้อเสนอโครงการออกแบบเส้นทางรถไฟแม่เหล็กไฟฟ้าความเร็วสูงตามปัจจัยด้าน ความงามและสิ่งแวดล้อม
- 1992 โครงการประกวดออกแบบอาคารนิทรรศการ Recento Ferial de Tenerife สเปน
- 1993 โครงการประกวดออกแบบงานทดลอง Wohnen 2000 ชตุท์การ์ท เยอรมนี
- 1993 ข้อเสนอโครงการออกแบบปรับปรุงโบสถ์ เซนต์ ปีเตอร์ เพื่อเป็นอนุสรณ์สถาน เมืองบริสโทล (Bristol) สหราชอาณาจักร
- 1994 โครงการออกแบบต้นแบบหลังคาคลุมส่วนบำบัดน้ำเสียและขยะมีพิษ
- 1994 น้ำพุสำหรับคริสเตียน วากเนอร์ (Christian Wagner) วาร์มบรอนน์ เยอรมนี
- 1995 บ้านพักอาศัยตระกูลฮัพโพลด์ (Huppold) เมืองบาส (Bath) สหราชอาณาจักร
- 1996 โครงการออกแบบส่วนต่อเติมศูนย์เทคโนโลยีสำนักงานใหญ่เฟสโต (Festo AG) เอสลิงเงน-แบร์คไฮม์ (Eslingen-Berkheim) เยอรมนี
- 1996 เติ้นท์รูปดาวในงานนิทรรศการสถาปัตยกรรม เวนิส เบียนนาเล่ (Architecture Venice biennial) อิตาลี
- 1996 โครงสร้างเติ้นท์รมในงานนิทรรศการสถาปัตยกรรม เวนิส เบียนนาเล่ (Architecture Venice biennial) อิตาลี
- 1996 เรือเหาะสำหรับเฉลิมฉลองครบรอบ 600 ปี สถาบันศิลปะเบอร์ลิน
- 1996 หอสูง ณ पोสท์พลาทซ์ (Postplatz) เดรสเดน (Dresden) เยอรมนี

- 1997 โครงการออกแบบศาลาสำหรับมูลนิธิโรคปอดแห่งเยอรมนี (Deutsche Lungenstiftung) ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติปี 2000 เมืองฮันโนเฟอร์ เยอรมนี
- 1997 โครงการประกวดออกแบบปรับปรุงสถานีรถไฟหลักชตุทท์การ์ท Stuttgart 21 เยอรมนี
- 1999 เติ่นท์สำหรับบริษัทเครื่องเรือน เมืองลินแบร์ก (Lönberg) เยอรมนี
- 1999 ข้อเสนอโครงการออกแบบโคลอสเซียม (Colosseum) สำหรับบริษัทผลิตเหล็กครูปป์ (Krupp steelworks) โบคุมตะวันตก (Bochum West) เยอรมนี
- 1999 ศาลาเวเนซุเอล่า ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติปี 2000 เมืองฮันโนเฟอร์ เยอรมนี
- 1999 ศาลาญี่ปุ่น ในงานจัดแสดงสินค้านานาชาติปี 2000 เมืองฮันโนเฟอร์ เยอรมนี
- 2001 ศาลาในสวน วาร์มบรอนน์ เยอรมนี
- 2001 พิพิธภัณฑ์เพื่อการรำลึกถึงอุโนะ ชิโย (Uno Chiyo memorial museum) เมืองอิวาคุนิ (Iwakuni) จังหวัดยามากุชิ (Yamaguchi) ญี่ปุ่น
- 2001 โครงการออกแบบส่วนปกคลุมปราสาทหินแวร์ทไฮม์ (Wertheim) เยอรมนี
- 2001 บ้านพักอาศัย เมืองลินแบร์ก เยอรมนี
- 2001 แนวความคิดสำหรับโครงการประกวดอาคารเวสต์เทรต เซ็นเตอร์ แห่งใหม่
- 2002 โครงการประกวดออกแบบโดยวิธีการเชิญ โครงการอาคารโรงงานกลาง บี.เอ็ม.ดับลิว. เมืองไลพ์ซิก (Leipzig) เยอรมนี
- 2003 โครงการประกวดออกแบบโดยวิธีการเชิญ โครงการสำนักงานใหญ่ธนาคารกลางยุโรป เมืองแฟรงก์เฟิร์ต เยอรมนี
- 2003 สะพานคนเดินเมคชเทินแบร์ก (Mechtenberg) พื้นที่บริเวณรูร์ (Ruhr) เยอรมนี
- 2003-2004 โครงการออกแบบส่วนปกคลุมพื้นที่ชลอตซ์พลัทซ์ (Schlossplatz) ชตุทท์การ์ท เยอรมนี
- 2004 โครงการออกแบบ Space laboratory ชุมชนโฮมบรอยช์ (Hombroich) ใกล้เมืองนอยส์ (Neuß) เยอรมนี
- 2004 องค์ประกอบสำหรับโครงการพิพิธภัณฑ์เสรีภาพ (Freedom Museum) นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา
- 2004 โครงการประกวดออกแบบชานชาลาสถานีเดินรถ อารีน่า เอาฟ์ชาลเคอ (Arena Aufschalke) เกลเซนเคียร์ชเชิน (Gelsenkirchen) เยอรมนี

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสิปวิชญ์ กำบัง
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤศจิกายน 2521
สถานที่เกิด	จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2545 สถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีสถาปัตยกรรม) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล พ.ศ. 2547 สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สถาปัตยกรรม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2559 Master of Engineering (Membrane structures) IMS, Bauhaus Dessau, Germany
ที่อยู่ปัจจุบัน	15/16 วิภาวดีรังสิต 35 ดอนเมือง กรุงเทพมหานคร

