



การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง สำหรับงานเทคอนกรีตโดยอากาศยาน
ไร้คนขับ

นายวรเมธ จิตประภากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง สำหรับงานเทคอนกรีตโดยอากาศยาน
ไร้คนขับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงร่างวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง สำหรับงานเทคอนกรีตโดย
อากาศยานไร้คนขับ

โดย นายวรเมธ จิตประภากร

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุนทรสุขกุล)

ชื่อ : นายวรมธ จิตประภากร
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วย
ตัวเอง สำหรับงานเทคอนกรีตโดยอากาศยานไร้คนขับ
สาขาวิชา : วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุคนธ์สุขกุล
ปีการศึกษา : 2567

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนแรกการพัฒนาสูตรส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยมุ่งพัฒนาสูตรส่วนผสมคอนกรีตให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน EFNARC (2002) และมีกำลังรับแรงอัดมากกว่า 18 MPa เพื่อความเหมาะสมสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน ผลการทดลองพบว่าปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสารลดน้ำปริมาณสูง 8% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน มีคุณสมบัติเหมาะสมด้านไหลแผ่ การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ความต้านทานการแยกตัว และกำลังรับแรงอัดที่เหมาะสม ส่วนที่สองศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการบินของโดรนพบว่า การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกและเวลาการบินที่นานขึ้นทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่น้ำหนักบรรทุกทุกไม่มีผลกระทบต่อเวลาการบินและความเร็วของโดรนหากน้ำหนักบรรทุกทุกไม่เกินขีดจำกัดการยกของโดรน ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบินขึ้นอยู่กับนักบิน นอกจากนี้การเทคอนกรีตในสนามจริงพบว่า แรงลมทำให้คอนกรีตกระจายตัวมากกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จึงต้องมีจุดรองรับเพื่อลดการสูญเสียวัสดุ ผลการเทด้วยโดรนพบว่า คอนกรีตไหลเข้าแบบได้ดี และมีกำลังรับแรงใกล้เคียงกับการเทแบบปกติส่วนที่สามนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้กับงานเทคอนกรีตด้วยโดรนของบ้านชั้นเดียว พบว่าการเทคอนกรีตด้วยโดรนช่วยลดปัญหาการเข้าถึงพื้นที่และจำนวนแรงงาน แต่ข้อจำกัดน้ำหนักบรรทุกทุกของโดรนทำให้ต้องใช้เวลาและพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้ต้องเพิ่มขนาดหรือจำนวนโดรนช่วยลดเวลาทำงานได้ (มีจำนวนทั้งสิ้น 102 หน้า)

คำสำคัญ : โดรน การเทคอนกรีต การเทคอนกรีตด้วยโดรน คอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Major Field : Civil Engineering
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok

Thesis Advisor : Professor Piti Sukontasukkul

Academic Year : 2024

ABSTRACT

This research is divided into three parts. The first part focuses on the development of Self-Compacting Lightweight Concrete (SCLC) mix proportions, aiming to meet the EFNARC (2002) standards and achieve compressive strength exceeding 18 MPa, suitable for drone-based pouring. The experimental results revealed that using 400 kg/m³ of cement combined with a high-range water reducer at 8% by weight of the binder provided optimal filling ability, passing ability, segregation resistance and compressive strength. The second part of the study on drone flight efficiency found that increasing the payload and flight duration resulted in higher energy consumption. However, the payload did not affect flight time and speed as long as it stayed within the drone's lifting capacity; pilot skill was key. Additionally, wind force in real-world concrete pouring caused more dispersion, requiring a support point to reduce waste. Subsequently, drone pouring effectively filled voids and compressive and flexural strengths similar to conventional

(Total 102 Pages)

Keywords : Drones, Concrete placement, Concrete placement using Drone, SCLC

[Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.ปิติ สุขนธสุขกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และดร.พชร เครือวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้แนวคิดสำหรับดำเนินงานวิจัย ดูแลเอาใจใส่ และช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างดีตลอดมาจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่สนับสนุนทุนวิจัย วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุน การวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N41A670178

ขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโทและปริญญาเอก รวมทั้งคณะเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ได้ร่วมให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่ได้ให้การสนับสนุน และต้องขอภัยสำหรับผู้ที่ไม่ให้ความช่วยเหลือที่ไม่ได้กล่าวรายนามมา ณ ที่นี้ ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นผลมาจากความกรุณาของบุคคลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

วรเมธ จิตประภากร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV)	4
2.2 คอนกรีตมวลเบาและวัสดุปอซโซลาน	12
2.3 คอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (Self-compacting concrete : SCC)	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	23
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย	24
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	38
4.1 ผลการศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่เหมาะสม สำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน	38
4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยโดรน	47
4.3 ผลจากการฝึกศึกษาเกี่ยวกับงานเทคอนกรีตของบ้านชั้นเดียว	70
บทที่ 5 สรุปผล	83
5.1 ผลการศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่เหมาะสม สำหรับการเทด้วยอากาศยานไร้คนขับ	83
5.2 ผลการศึกษาความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยโดรน	83
5.3 กรณีศึกษาเกี่ยวกับงานเทคอนกรีตของบ้านชั้นเดียวในสภาพการทำงานจริง	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของโดรน	92
ภาคผนวก ข ข้อมูลจำเพาะของถังควบคุมการเทคอนกรีตด้วยโดรน	96
ประวัติผู้วิจัย	102



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย (FA) ที่ใช้ในการทดสอบ	23
3-2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเอง	25
3-3 เกณฑ์ความสามารถการทำงานได้ของคอนกรีตไหลตามมาตรฐาน EFNARC (2002)	26
3-4 ข้อมูลจำเพาะของโดรน	31
3-5 ข้อมูลจำเพาะของถังเทคอนกรีตด้วยโดรน	31
3-6 การทดสอบการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยใช้จตุรรองรับคอนกรีต	36
4-1 การคัดเลือกสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเอง	47
4-2 พลังงานไฟฟ้าของการบินโดรนโดยมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก	49
4-3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งในการบินและเทคอนกรีตของน้ำหนักบรรทุก 4 กิโลกรัม	53
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตกับความสูงขณะเท	56
4-5 ปัจจัยในการเทคอนกรีตด้วยโดรนระหว่างการปล่อยอิสระและแบบมีจตุรรองรับ	63
4-6 เปรียบเทียบจำนวนรอบการเทและค่ากำลังรับแรงระหว่างปล่อยอิสระและมีจตุรรองรับคอนกรีต	63
4-7 เปรียบเทียบอัตราการสูญเสียคอนกรีตระหว่างการปล่อยอิสระและแบบมีจตุรรองรับ	64
4-8 อัตราพลังงานและเวลาที่ใช้ในการบินและเทคอนกรีตด้วยโดรน	72
4-9 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนฐานราก	73
4-10 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนเสา	74
4-11 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนคานพื้นชั้น 1	76
4-12 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนโอส	77
4-13 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนบ้านชั้นเดียว	79
4-14 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยรถปัมลากของบ้านชั้นเดียว	80
4-15 เปรียบเทียบผลการเทคอนกรีตระหว่างรถปัมลากและโดรนของบ้านชั้นเดียว	80
4-16 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยรถปัมบูมในบ้านชั้นเดียว	81
4-16 เปรียบเทียบผลการเทคอนกรีตระหว่างรถปัมบูมและโดรนของบ้านชั้นเดียว	82

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 การจำแนกประเภทของ UAV ตามปีกและใบพัด	5
2-2 การพิมพ์โฟลียูรีเทนโฟมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติทางอากาศ	11
2-3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดาและ Self-Compacting Concrete	15
2-4 พฤติกรรมการไหลของ Self-Compacting Concrete	16
2-5 ผลการทดสอบ Slump Flow และ T _{500mm} Slump Flow กับ %Fly Ash	18
2-6 ผลการทดสอบ V-funnel Test และ J-ring Test กับ %Fly Ash	18
2-7 ผลการทดสอบกำลังอัดในช่วงอายุการบ่มที่ 7, 28 และ 56 วัน	18
2-8 ผลทดสอบ Slump flow, L-Box, V funnel ตามมาตรฐาน EFNARC 2002	19
2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหินภูเขาไฟกับกำลังรับแรงอัด	19
2-10 ผลการทดสอบคอนกรีตไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเองกับปริมาณเถ้าลอย	20
2-11 ผลการทดสอบกำลังอัด ความต้านทานแรงดึง กำลังรับแรงดัด ที่ 7 กับ 28 วัน	20
3-1 มวลรวมเบา	23
3-2 การทดสอบไหลแผ่และเวลาของการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 ซม.	27
3-3 การทดสอบไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-Box test)	27
3-4 การทดสอบความต้านทานการแยกตัว (GTM screen stability test)	28
3-5 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวแคต	29
3-6 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4	29
3-7 การทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C78	30
3-8 โดรนและอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับโดรน	30
3-9 ถังบรรจุและเทคอนกรีตด้วยรีโมทคอนโทรล	31
3-10 วัดมิติเตอร์	32
3-11 มาตรฐานวัดอัตราเร็วของลม	32
3-12 แบบหล่อขนาดต่างๆ ในการเทคอนกรีตด้วยโดรน	32
3-13 กรวยรองรับคอนกรีตจากการเทคอนกรีตด้วยโดรน	33
3-14 ทิศทางการบินโดรนโดยมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก	34
3-15 ทิศทางการบินโดรนโดยมีการเทคอนกรีตด้วยโดรน	34
3-16 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของคอนกรีต	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-1 ค่าการไหลแผ่	39
4-2 ค่าเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร	40
4-3 ค่าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน	41
4-4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการแยกตัว	42
4-5 ค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีต	43
4-6 ค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดของคอนกรีต	44
4-7 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน	45
4-8 ค่ากำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 28 วัน	46
4-9 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก	50
4-10 อัตราการใช้เวลาบินของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก	51
4-11 อัตราการใช้ความเร็วบินของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก	52
4-12 การกระจายตัวของคอนกรีตขณะเทในห้องปฏิบัติการ	54
4-13 เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ	55
4-14 การกระจายตัวของคอนกรีตขณะเทในสนามจริง	56
4-15 เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตในสนามจริง	57
4-16 เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตระหว่างห้องปฏิบัติการและสนามจริง	58
4-17 เปอร์เซ็นต์การแผ่กระจายคอนกรีตเมื่อเทียบกับระดับความสูง 20 เซนติเมตร	59
4-18 ความเร็วลมขณะเทคอนกรีตในสนามจริง	60
4-19 ความเร็วลมขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ	60
4-20 การเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยการปล่อยอิสระ	65
4-21 โดรนขณะเทคอนกรีตของแบบหล่อลูกบาศก์	65
4-22 หลังจากการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแบบหล่อลูกบาศก์	65
4-23 พื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีตบนแข็งตัว	65
4-24 ค่ากำลังรับแรงอัดในแบบหล่อลูกบาศก์	66
4-25 โดรนขณะเทคอนกรีตของแบบหล่อคาน	67
4-26 หลังจากการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแบบหล่อคาน	67
4-27 พื้นผิวคานคอนกรีตบนแข็งตัว	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-28 ค่ากำลังรับแรงดัดในแบบหล่อคาน	68
4-29 โดรนขณะเทคอนกรีตของแบบหล่อคานซ่อมแซม	69
4-30 หลังจากการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแบบหล่อคานซ่อมแซม	69
4-31 พื้นผิวคานซ่อมแซมคอนกรีตตอนแข็งตัว	69
4-32 ค่ากำลังรับแรงดัดในแบบหล่อคานซ่อมแซม	70
4-33 แบบแปลนบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 1	71
4-34 ทิศทางการบินโดรนในการเทคอนกรีตของแปลนฐานรากและเสา	73
4-35 ทิศทางการบินโดรนในการเทคอนกรีตของแปลนคานพื้นชั้น 1	75
4-36 ทิศทางการบินโดรนในการเทคอนกรีตของแปลนเฉล	77
4-37 รถปัมลาก EVERDIGM รุ่น ETP490	79
4-38 รถปัมบูมคอนกรีต EVERDIGM รุ่น ECP43 CX-5	81
ก-1 โดรนรุ่น Heavy-lift Quadcopter UAV	93
ก-2 แท่นชาร์จแบบคู่ของ Ultra Power รุ่น UP1200AC DUO-125	94
ก-3 แบตเตอรี่โดรนของ Herwin รุ่น Flight Battery Pack	94
ก-4 รีโมทควบคุมโดรน รุ่น Jumper T16	95
ข-1 แบบจำลองอุปกรณ์ถึงเทคอนกรีตด้วยโดรน	97
ข-2 มุมมองของอุปกรณ์ถึงเทคอนกรีตด้วยโดรน	98
ข-3 ส่วนประกอบของถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน	100
ข-4 หลักการทำงานของถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่ใช้แรงงานมากที่สุด ตามข้อมูลจากองค์การแรงงานระหว่างประเทศ อุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการจ้างงานประมาณ 8.4% ของแรงงานทั่วโลก [1] ซึ่งทำให้แรงงานมีบทบาทสำคัญและส่งผลกระทบอย่างมากในอุตสาหกรรมนี้ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญกับวิกฤติสำหรับประชากรอย่างรุนแรง ตามข้อมูลจากสำนักงานสถิติแห่งชาติ ในปี 2565 มีจำนวนเด็กเกิดใหม่อยู่ที่ 502,000 คน ซึ่งลดลงจากอัตราการเกิดของเด็กไทย ในช่วงปี 2555 ถึง 2564 ที่มีเด็กเกิดเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 6 แสนถึง 9 แสนคนต่อปี นอกจากนี้ยังพบว่า จำนวนผู้เกิดใหม่มีจำนวนน้อยกว่าจำนวนผู้ตายในแต่ละปี [2] ผลจากสถานการณ์ดังกล่าวได้ทำให้ประเทศไทยกลายเป็นสังคมผู้สูงอายุอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลให้ประเทศไทยมีปัญหาด้านแรงงานและต้องพึ่งพาแรงงานต่างชาติมากขึ้น

จากสถานการณ์ที่กล่าวมาข้างต้น การขาดแคลนแรงงานที่มีผลเสียต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างในอนาคตข้างหน้า ทำให้แนวโน้มในด้านงานวิจัยในปัจจุบัน จึงมุ่งเน้นไปสู่การพัฒนาระบบการก่อสร้างให้เป็นระบบอัตโนมัติมากขึ้น เพื่อลดการใช้แรงงาน ซึ่งการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) หรือโดรน มาประยุกต์ใช้ร่วมกับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ถือเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่สามารถอำนวยความสะดวกและเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีการเข้าถึงที่ยากลำบาก ทำให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโดรนได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [3] ซึ่งในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีการนำโดรนมาใช้ในหลากหลายงาน เช่น การตรวจสอบอาคาร สะพาน ถนน การตรวจสอบสถานที่ก่อสร้าง การสำรวจที่ดิน และทำแผนที่ทางอากาศ เป็นต้น [4]

งานวิจัยนี้เห็นถึงประโยชน์และความสามารถของโดรนในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยแนวโน้มการพัฒนาโดรนในอนาคตนั้น มุ่งไปสู่การพัฒนาโดรนให้มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดในการนำโดรนมาช่วยในกระบวนการเทคอนกรีต ซึ่งในงานก่อสร้างขนาดใหญ่จากเดิมที่เคยใช้แรงงานจำนวนมากในการเทคอนกรีต ใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ และใช้เวลาหลายชั่วโมงในการทำงาน โดยคาดหวังว่าการนำเอาโดรนมาร่วมในกระบวนการเทคอนกรีตจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลำเลียงเข้าสู่พื้นที่ก่อสร้างในสภาพภูมิประเทศที่ไม่เอื้ออำนวยหรือการขนส่งภาคพื้นดินมีข้อจำกัด รวมถึงการลดระยะเวลาในการทำงาน ลดจำนวนแรงงานที่เกี่ยวข้องลงได้ และเพิ่มความปลอดภัยในสถานที่ทำงานมากขึ้น ทั้งนี้งานวิจัยยังเกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสัดส่วนผสมของ

คอนกรีตเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานโดรน ซึ่งคอนกรีตต้องมีความสามารถในการไหลที่ดี สามารถเติมเต็มช่องว่างภายใต้น้ำหนักด้วยตัวเอง และสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ รวมถึงด้านทานการแยกตัว นอกจากนี้คอนกรีตยังต้องมีน้ำหนักที่เบาและความแข็งแรงที่เพียงพอ เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการเทคอนกรีตด้วยโดรน

แนวทางการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การพัฒนาวัสดุคอนกรีตที่มีความสามารถในการเท โดยทำการแปรผันวัสดุซีเมนต์ มวลรวมเบา วัสดุปอซโซลาน และสารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองได้แก่ การไหลแผ่ ระยะเวลาของการไหลแผ่ การไหลผ่านสิ่งกีดขวาง และความต้านทานการแยกตัว หลังจากนั้นคัดเลือกจากสัดส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานยอมรับ EFNARC (2002) และมีกำลังรับแรงที่เหมาะสม 2) การศึกษาความสามารถการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน ประกอบด้วยการทดสอบประสิทธิภาพการบินของโดรนทั้งในสภาพที่มีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์ผลกระทบของแรงลมต่อการเทคอนกรีตด้วยโดรน และความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง 3) กรณีศึกษาเกี่ยวกับงานเทคอนกรีตด้วยโดรนในสภาพการทำงานจริง เพื่อให้ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ปรับปรุงและประยุกต์ใช้ในงานเทคอนกรีตด้วยโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่เหมาะสม สำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรนในแง่ของพลังงานที่ใช้และสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ได้จากการเทด้วยโดรนเทียบกับการเทปกติ

1.2.3 เพื่อจำลองการเทคอนกรีตด้วยโดรนในสภาพการทำงานจริง รวมถึงวิเคราะห์พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยใช้บ้านชั้นเดียวเป็นกรณีศึกษา

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางด้านการไหลอัดแน่นด้วยตัวเองของคอนกรีตมวลเบา

1.3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มวลรวมเบา มวลรวมละเอียด เถ้าลอย และสารลดน้ำปริมาณสูงพิเศษ (Type G)

1.3.1.2 การทดสอบการไหลแผ่และเวลาของการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน EFNARC (2002)

1.3.1.3 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (L-Box) ตามมาตรฐาน EFNARC (2002)

1.3.1.4 การทดสอบความต้านทานการแยกตัว (GTM Screen Stability) ตามมาตรฐาน EFNARC (2002)

1.3.1.5 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C138

1.3.1.6 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C191

1.3.1.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4

1.3.1.8 การทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C78

1.3.2 การศึกษาความสามารถการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

1.3.2.1 สัดส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่มีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์ EFNARC (2002) และมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 18 เมกะปาสคาล

1.3.2.2 อุปกรณ์ใช้ในการทำวิจัยประกอบไปด้วย โดรน อุปกรณ์ถังเทคอนกรีต วัดต์ มิเตอร์ มาตรวัดความเร็วลม และจตุรรองรับคอนกรีต

1.3.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพการบินของโดรนในสภาวะมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก รวมถึงสภาวะที่มีการเทคอนกรีต โดยวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ ระยะเวลาการบิน และอัตราเร็วของโดรน

1.3.2.4 การทดสอบผลกระทบของแรงลมต่อการเทคอนกรีตด้วยโดรน ทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงลมต่อการกระจายตัวของคอนกรีต

1.3.2.5 การทดสอบการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองลงในแบบหล่อ ลูกบาศก์ คาน และคานข้อมแซม เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและดัดระหว่างวิธีการเทคอนกรีต โดยใช้โดรนกับการเทคอนกรีตแบบปกติ

1.3.3 กรณีศึกษาเกี่ยวกับงานเทคอนกรีตด้วยโดรนในสภาพการทำงานจริง

คัดเลือกแบบบ้านชั้นเดียวที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการเทคอนกรีตด้วยโดรน โดยจำลอง พื้นที่เทคอนกรีต ระยะทางการเคลื่อนที่ของโดรน ระยะเวลาปฏิบัติงาน และอัตราการใช้พลังงาน เพื่อให้ผลการวิจัยสามารถนำไปปรับปรุงและประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน EFNARC (2002) และมีกำลังรับแรงที่เหมาะสม เพื่อสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน

1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพการบินโดรนและความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน และทราบถึงผลกระทบจากแรงลมต่อการเทคอนกรีตด้วยโดรน ทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

1.4.3 ทราบถึงข้อมูลเบื้องต้นการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยใช้บ้านชั้นเดียวเป็นกรณีศึกษา ซึ่งนำไปสู่แนวทางการใช้งานโดรนในงานเทคอนกรีตให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) หรือ โดรน (Drone) เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการบนเครื่องแต่สามารถควบคุมการทำงานได้จากระยะไกล ถูกใช้งานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1918 เพื่อสนับสนุนการทำสงครามโลกครั้งที่ 1 [5] ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการนำอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การใช้งานในปฏิบัติการทางการเกษตร การสำรวจและการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น

2.1.1 ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับสามารถจำแนกประเภทตามปีกและใบพัด แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

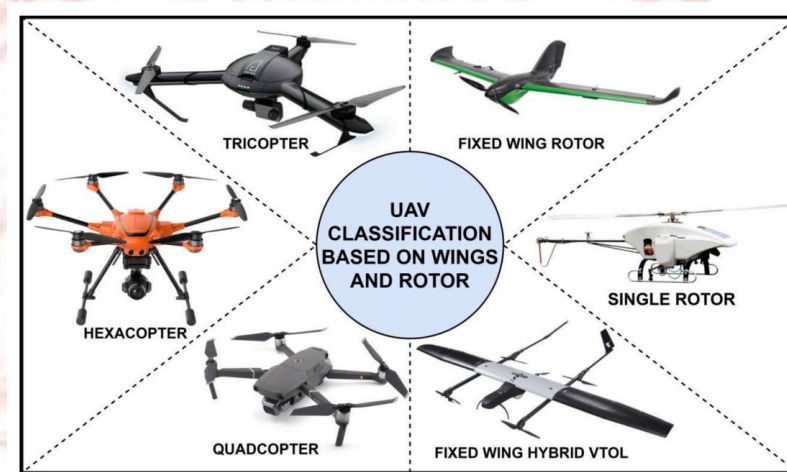
2.1.1.1 Multi-rotor drones เป็นประเภทโดรนที่ได้รับความนิยมสูงสุดสำหรับการทำแผนที่ทางอากาศ โดยทั่วไปจะใช้สำหรับการถ่ายภาพทางอากาศ การบันทึกวิดีโอ และการสำรวจทางอากาศ เนื่องจากมีความคล่องตัวและไม่จำเป็นต้องใช้รันเวย์ในการบินขึ้นและลงจอด โดรนประเภทนี้สามารถจำแนกตามจำนวนใบพัด เช่น Tri-copters (3 ใบพัด), Quad-copters (4 ใบพัด) และ Hexa-copters (6 ใบพัด) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของโดรนหลายใบพัดคือระยะเวลาการบินและความเร็วที่ค่อนข้างจำกัด ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการทำแผนที่ทางอากาศในพื้นที่ขนาดใหญ่ ปัจจุบันโดรนหลายใบพัดสามารถลอยอยู่ในอากาศได้โดยเฉลี่ย 20-30 นาที

2.1.1.2 Fixed wing drones เป็นโดรนที่มีปีกคงที่ ทำงานตามหลักการเดียวกับเครื่องบินโดยสาร โดยจะสร้างแรงยกจากปีกคงที่แทนการสร้างแรงขับจากใบพัดแนวตั้ง โดรนประเภทนี้ใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและต้องมีรันเวย์ในการบินขึ้นและลงจอด แม้จะมีความเร็วสูงกว่าและสามารถบินได้นานกว่าโดรนประเภท Multi-rotor drones โดยทั่วไปมีระยะเวลาการบินประมาณ 30-60 นาที และสามารถบรรทุกของหนักได้ในระยะทางไกลด้วยการใช้พลังงานน้อย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการทำแผนที่ภูมิประเทศในพื้นที่ขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม โดรนแบบปีกคงที่ไม่สามารถลอยอยู่กับที่ในอากาศได้ ซึ่งทำให้ไม่เหมาะสำหรับการสร้างแผนที่ทางอากาศโดยละเอียด [6]

2.1.1.3 Fixed wing hybrid VTOL เป็นโดรนไฮบริดที่รวมคุณสมบัติของปีกคงที่และการบินขึ้นลงในแนวดิ่ง โดรนประเภทนี้มีความประหยัดพลังงานมากกว่าโดรนหลายใบพัด และมีความเร็วและระยะการบินสูงกว่าทั้งโดรนแบบปีกคงที่และโดรนหลายใบพัด โดยไม่ต้องกางปีกที่มากสำหรับการบินขึ้นและลงจอดเหมือนกับโดรนแบบปีกคงที่ ซึ่งสามารถบินขึ้นแนวดิ่งและแนวนอนบนเส้นทางที่

กำหนดไว้ล่วงหน้าและที่ระดับความสูงที่ระบุ เมื่อเสร็จสิ้นภารกิจ โดรนจะลงจอดในแนวตั้ง กลับไปยังจุดเริ่มต้น

2.1.1.4 Single helicopter drones เป็นโดรนที่ใช้การออกแบบแบบเฮลิคอปเตอร์ สามารถขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์เบนซินและบินได้นานกว่าโดรนหลายใบพัด ซึ่งทำให้เป็นทางเลือกที่ดีเมื่อจำเป็นต้องบินพร้อมกับน้ำหนักบรรทุกทุกสูง แต่ระบบการบินมีความซับซ้อนและราคาค่อนข้างสูง นอกจากนี้ ยังต้องการการบำรุงรักษาเชิงกลมากขึ้นเนื่องจากความซับซ้อนทางเทคนิค [7]



ภาพที่ 2-1 การจำแนกประเภทของ UAV ตามปีกและใบพัด [8]

2.1.2 หลักการทำงานพื้นฐานของอากาศยานไร้คนขับ

2.1.2.1 โหมดควบคุมการทำงานของโดรน แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะหลัก ดังนี้

1) การควบคุมแบบอัตโนมัติจากระยะไกล: วิธีนี้ใช้การควบคุมโดรนให้บินไปตามพิกัดที่กำหนดโดยใช้วิทยุจากพื้นดิน อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมคือรีโมทคอนโทรล ซึ่งผู้ควบคุมต้องมองเห็นโดรนอยู่ในสายตาตลอดเวลาเพื่อให้การควบคุมมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังมีการควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่อาจต้องมีการติดตั้งเสาอากาศที่มีกำลังส่งความถี่สูง ระบบคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยหน่วยเซ็นเซอร์ IMU (Inertial Measurement Unit) [9] ซึ่งทำงานร่วมกับ GPS และเครื่องมือตรวจจับอื่น ๆ เพื่อรักษาระดับความสูงและตำแหน่งการบินให้อยู่ในระดับที่แน่นอน

2) การควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเอง: วิธีนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบซับซ้อนในการควบคุมโดรนอย่างอิสระ โดยไม่จำเป็นต้องส่งหรือรับสัญญาณความถี่วิทยุจากสถานีภาคพื้น โปรแกรมจะกำหนดเส้นทางการบินล่วงหน้าและใช้เครื่องรับสัญญาณของระบบดาวเทียมนำทาง เช่น GPS (Global Positioning System) เพื่อช่วยในการติดตามตำแหน่ง

ปัจจุบันของโดรนอย่างแม่นยำ ระบบ GPS สามารถระบุตำแหน่งพิกัดที่แน่นอนและใช้ในการกำหนดเส้นทาง ทำให้การบินของโดรนมีความแม่นยำและปลอดภัยมากขึ้น

2.1.2.2 กลไกการทำงานพื้นฐานของโดรน (UAV) ประกอบไปด้วย 8 ส่วน ดังนี้

- ใบพัด (Propellers) และ มอเตอร์ (Motors) ใช้ในการสร้างแรงยกและแรงขับเคลื่อนสำหรับการบินและเคลื่อนที่ของโดรน
- เฟรม (Frame) โครงสร้างหลักที่รองรับส่วนประกอบทั้งหมดของโดรน
- เซ็นเซอร์ (Sensors) อุปกรณ์ที่ตรวจจับและประมวลผลข้อมูลต่าง ๆ เพื่อให้การเป็นไปอย่างแม่นยำและปลอดภัย เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหวและการหมุนของโดรน
- ตัวควบคุมความเร็ว (Electronic Speed Controller: ESC) อุปกรณ์ที่สำคัญในระบบของโดรนที่ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์อย่างละเอียดและแม่นยำ
- ตัวควบคุมการบิน (Flight Controller) อุปกรณ์หลักที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดของ โดรน โดยแปลงข้อมูลจากตัวรับสัญญาณ โมดูล GPS จอภาพ แบตเตอรี่ หน่วยตรวจวัดความเคลื่อนไหว และเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เพื่อควบคุมมอเตอร์และการเคลื่อนที่ของโดรนในระบบควบคุมอัตโนมัติ (Autopilot)
- ตัวรับสัญญาณและชุดแบตเตอรี่ (Receiver and Battery) อุปกรณ์ที่รับข้อมูลจากสถานีควบคุมและจ่ายพลังงานให้กับโดรน
- อุปกรณ์ควบคุมความเสถียร (Stabilization Systems) ช่วยในการรักษาความเสถียรและสมดุลของโดรน เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับอัตราเร่ง การหมุน และการเอียง
- อุปกรณ์ FPV (First Person View) รวมถึงกล้องถ่ายภาพและกล้องถ่ายทอดภาพเคลื่อนไหว ซึ่งช่วยให้ผู้ควบคุมสามารถมองเห็นมุมมองเสมือนจริงจากโดรน การใช้ FPV ช่วยให้โดรนบินได้สูงและไกลขึ้น พร้อมทั้งเพิ่มความแม่นยำในการบิน โดยเฉพาะเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางต่าง ๆ

นอกจากนี้ยังมีระบบการสื่อสารที่สำคัญ ซึ่งเป็นการติดต่อระหว่างโดรนและสถานีควบคุมภาคพื้นดิน โดยใช้สัญญาณรับ-ส่งที่มีความถี่ไม่ทับซ้อนกันเพื่อป้องกันการรบกวน การสื่อสารนี้รวมถึงสัญญาณควบคุมการบินที่ส่งมาจากอุปกรณ์ควบคุม เช่น Joystick เพื่อควบคุมการบินของโดรน

2.1.2.3 ระบบนำทางของโดรนมีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมและกำหนดเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยมีระบบนำทางหลัก ๆ ดังนี้

- ระบบวิทยุโดยตรงสำหรับการควบคุมระยะไกล ระบบนี้เกี่ยวข้องกับควบคุมโดรนโดยมนุษย์ผ่านอุปกรณ์ที่ใช้สื่อสาร เช่น เครื่องส่งหรือรับวิทยุ สมาร์ทโฟน หรือคอมพิวเตอร์ โดยการสื่อสารจะเกิดขึ้นในแนวสายตาของผู้ปฏิบัติงานเท่านั้น ซึ่งจำกัดระยะการควบคุม [8]
- ระบบการนำทางด้วยดาวเทียม ใช้การสื่อสารกับระบบดาวเทียม เช่น GPS (Global Positioning System) เพื่อให้ข้อมูลตำแหน่งของโดรนในเวลาจริง ช่วยให้โดรนมีระยะการมองเห็นที่ไกลและสามารถติดตามตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ
- ระบบนำทางด้วยเสียง (Ultrasonic) ใช้คลื่นเสียงเพื่อคำนวณตำแหน่งของโดรน โดยการส่งสัญญาณเสียงออกไปและรอรับสัญญาณที่สะท้อนกลับ สามารถวัดเวลาที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณเสียงเพื่อคำนวณระยะทางและตำแหน่งของโดรน
- ระบบ LIDAR (Light Detection and Ranging) ใช้แสงในการวัดระยะทาง โดยการส่งสัญญาณแสงและวัดเวลาที่ใช้ในการสะท้อนกลับจากวัตถุในสภาพแวดล้อม สามารถสร้างแผนที่ 3D สำหรับการนำทางและการสำรวจ
- กล้องสำหรับการนำทาง ใช้การระบุตำแหน่งโดยการสแกนพื้นผิวและวิเคราะห์ภาพ เพื่อค้นหาเส้นทางที่เหมาะสม
- IMU (Inertial Measurement Unit) เซ็นเซอร์วัดความเร็วและความเร่งโดรน โดยใช้ข้อมูลจาก IMU เพื่อคำนวณตำแหน่งและการเคลื่อนไหวของโดรน
- บารอมิเตอร์ (Barometer) วัดความดันอากาศเพื่อคำนวณระดับความสูงโดรน ช่วยในการติดตามและกำหนดความสูงของโดรนอย่างแม่นยำ

ระบบเซ็นเซอร์ทั้งหมดเหล่านี้ทำงานร่วมกันเพื่อสนับสนุนตัวควบคุมการบิน (Flight Controller) ทำให้การบินของโดรน มีความเสถียรและแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยการรวมกันของเทคโนโลยีเหล่านี้ช่วยให้โดรนสามารถทำงานได้ตามที่กำหนด และสามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและคำสั่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10]

2.1.3 ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ

ในยุคที่ผ่านมาโดรนมักใช้เป็นยุทธโธปกรณ์ในกองทัพ แต่ในปัจจุบัน โดรนได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในโลกธุรกิจ โดยเฉพาะในด้านการขนส่ง การพัฒนาโดรนมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง และสามารถขนส่งน้ำหนักมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ บริษัทต่าง ๆ ร่วมมือกับนักวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีโดรนที่สามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้ ตัวอย่างเช่น บริษัท Aero Development Japan ผู้ผลิตโดรนจากญี่ปุ่น ร่วมกับ TAIYO ELECTRIC

ENGINEERING ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีเพื่อการประหยัดพลังงาน ได้พัฒนาโดรนที่สามารถบรรทุกน้ำหนักสูงสุด 50 กิโลกรัม และบินได้นานกว่า 1 ชั่วโมง โดรนนี้ใช้เทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium Ion) ซึ่งมีขนาดเล็กและความจุสูง ร่วมกับระบบเครื่องยนต์แบบไฮบริด ที่ใช้เทคโนโลยีแม่เหล็กและกังหันก๊าซ พร้อมติดตั้งเครื่องยนต์หลายเครื่องในโดรนตัวเดียว ทำให้โดรนสามารถบินได้ไกลเป็นสองเท่าของโดรนที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและมีเครื่องยนต์เพียงตัวเดียว [11]

ในปี 2018 บริษัท Boeing ซึ่งเป็นผู้ผลิตเครื่องบินชั้นนำจากชิคาโก รัฐอิลลินอยส์ สหรัฐอเมริกา ประสบความสำเร็จในการทดสอบการบินของพาหนะขนส่งสินค้าไร้คนขับต้นแบบ ภายใต้ชื่อ Unmanned electric vertical takeoff and landing (e-VTOL) cargo air vehicle (CAV) prototype โครงการนี้ใช้เวลาในการออกแบบและสร้างไม่ถึงสามเดือน โดยต้นแบบ e-VTOL ของ Boeing มีขนาดความยาว 4.57 เมตร ความกว้าง 5.49 เมตร และความสูง 1.22 เมตร โดยมีน้ำหนักรวม 339 กิโลกรัม ติดตั้งใบพัดแปดใบและขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ออกแบบเฉพาะ โดยตัวพาหนะสามารถบินขึ้นและลงในแนวดิ่งได้อย่างอัตโนมัติ รองรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดถึง 227 กิโลกรัม และสามารถบินได้ในระยะทางระหว่าง 15 ถึง 30 กิโลเมตร [12]

ในปี 2020 เมื่อเกิดการแพร่ระบาดของ COVID-19 ธุรกิจหลายแห่งได้ปรับเปลี่ยนมาใช้ระบบการขนส่งแบบไร้การสัมผัสเชิงพาณิชย์ (Social Distancing) เพื่อเพิ่มความสะดวกและลดการพบปะระหว่างบุคคล หนึ่งในบริษัทที่นำเทคโนโลยีนี้มาใช้คือ F-drones จากประเทศสิงคโปร์ ซึ่งเริ่มให้บริการโดรนส่งพัสดุในระยะที่เกินกว่าระยะสายตา (Beyond Line of Sight) โดยโดรนของบริษัทได้ทำการบรรทุกวิตามินน้ำหนัก 2 กิโลกรัมไปยังเรือขนส่งสินค้าที่อยู่ห่างจากชายฝั่งกว่า 2.7 กิโลเมตร ภายในเวลาเพียง 7 นาที ซึ่งวิธีนี้ช่วยลดต้นทุนการขนส่งได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการขนส่งด้วยเรือเล็กหรือเฮลิคอปเตอร์ นอกจากนี้ บริษัทยังมีแผนจะขยายขีดความสามารถของโดรนในการส่งพัสดุน้ำหนัก 100 กิโลกรัมไปยังปลายทางที่ห่างจากชายฝั่งกว่า 100 กิโลเมตร ภายในปี 2021 [13]

2.1.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับในงานวิศวกรรมโยธา โดรนสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้หลากหลาย [14] ดังต่อไปนี้

2.1.4.1 การใช้โดรนในการสำรวจอาคารหรือสะพานเพื่อการตรวจสอบและประเมินข้อบกพร่องต่าง ๆ นับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากโดรนสามารถเข้าถึงพื้นที่ที่ซับซ้อนหรือยากต่อการเข้าถึงได้อย่างง่ายดาย การเลือกใช้โดรนขนาดเล็กสำหรับการสำรวจอาคารมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้อง ประหยัดเวลา และเพิ่มระดับความปลอดภัยในกระบวนการสำรวจ นอกจากนี้ โดรนขนาดเล็กยังสามารถเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและแม่นยำในพื้นที่จำกัด ทำให้การสำรวจและตรวจสอบอาคารสามารถดำเนินการได้ในระยะเวลาที่สั้นลงและประหยัดทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Martina Mandirola et al. [15] ได้ทำการศึกษาการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของสะพานด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ไม่ได้จำกัดการใช้งานเฉพาะในสถานการณ์ภัยพิบัติ เช่น หลังเกิดแผ่นดินไหวเท่านั้น แต่ยังถูกนำมาใช้ในเชิงป้องกันอย่างต่อเนื่อง เพื่อสนับสนุนกลยุทธ์การลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติและรักษาโครงสร้างพื้นฐานของสะพานที่ได้รับการฟื้นฟู การศึกษานี้ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการตรวจสอบปกติเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมถึงการอธิบายขั้นตอนการประเมินขอบเขตและระดับความรุนแรงของความเสียหายโดยใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ โดยข้อมูลทางอากาศที่เก็บด้วยกล้องความละเอียดสูงบนโดรนที่ควบคุมจากระยะไกล จะถูกนำมาประมวลผลในรูปแบบโมเดลเสมือนจริงแบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถตรวจสอบสภาพแวดล้อมจริงและให้ข้อมูลสำคัญสำหรับการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์โครงสร้าง นอกจากนี้ ขั้นตอนทั้งหมดนี้ยังได้รับการตรวจสอบอย่างละเอียดและสนับสนุนด้วยแอปพลิเคชันที่เกี่ยวข้องเพื่อการเก็บรวบรวมข้อมูลและผลลัพธ์ที่แม่นยำ

2.1.4.2 การบันทึกภาพความร้อนด้วยโดรน สามารถใช้โดรนเพื่อบันทึกภาพความร้อนทางอากาศ การถ่ายภาพความร้อนของบางส่วนของอาคารสามารถช่วยในการตรวจจับการแทรกซึมของน้ำและการรั่วไหลก่อนที่จะเกิดความเสียหายร้ายแรง บริเวณที่เย็นและชื้นจะแสดงเป็นสีน้ำเงิน เข้มบนหน้าจอที่บันทึกภาพความร้อน ผู้ตรวจสอบสามารถใช้อุปกรณ์เพื่อตรวจสอบหลังคา ระบุจุดรั่ว และตรวจจับการสูญเสียความร้อน เพื่อให้กระบวนการเป็นไปอย่างง่าย ปลอดภัย และรวดเร็วมากขึ้น [16]

2.1.4.3 การทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจที่ดิน โดรนเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการทำแผนที่ภูมิประเทศและการสำรวจที่ดิน ด้วยความสามารถในการเก็บข้อมูลจำนวนมากในเวลาอันสั้นและความแม่นยำสูง อีกทั้งโดรนสามารถสร้างแบบจำลอง 3 มิติของพื้นผิวดิจิทัล (Digital Surface Model : DSM) หรือภูมิประเทศได้ ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่เก็บได้จากโดรนสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์และการวางแผนในหลายด้าน เช่น การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ การวางแผนการใช้ที่ดิน การก่อสร้าง การสำรวจวิเคราะห์แหล่งพลังงานทดแทน และการประเมินความเสี่ยงจากภัยธรรมชาติ เป็นต้น

รัฐพล พรหมมาศ และจักรพงษ์ ไชยวงศ์ [17] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้อากาศยานไร้คนขับ (โดรน) เพื่อถ่ายภาพมุมสูงและจัดทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ โดยมุ่งเน้นการให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการจัดทำแผนที่และตรวจสอบการใช้ประโยชน์ที่ดิน ผลการวิจัยพบว่า การใช้โดรนมีต้นทุนต่ำกว่าวิธีการจัดทำแผนที่อื่น ๆ และสามารถสร้างภาพแผนที่ที่ทันสมัยและละเอียด โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้ นอกจากนี้การใช้โดรนยังช่วยในการวางแผนการบริหารจัดการพื้นที่เกษตร การใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพและติดตามมีการเปลี่ยนแปลงของ

ทรัพยากรธรรมชาติอย่างรวดเร็ว ภาพที่ได้สามารถใช้ในโฆษณาและประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยว ซึ่งช่วยให้ชุมชนสามารถนำไปใช้เพื่อการพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืนได้เอง

ธรรวฒิ บุญเหลือ [18] ได้ศึกษาและประยุกต์ใช้เครื่องบินบังคับอัตโนมัติ (Drone) เพื่อเพิ่มฐานข้อมูลของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) สำหรับงานสถาปัตยกรรมผังเมือง ข้อมูลที่ได้รับรวมถึงข้อมูลอาคาร พื้นที่ปกคลุม การใช้พื้นที่ และภาพพื้นดิน ซึ่งช่วยปรับปรุงความทันสมัยและความละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่สำหรับการออกแบบชุมชนเมืองและสภาพแวดล้อมในเชิงลึก การใช้รูปถ่ายทางอากาศจากเครื่องบินบังคับอัตโนมัติช่วยสร้างแผนที่ฐาน (Base Map) ที่ทันสมัยและมีความละเอียดสูง รวมถึงใช้เทคนิคการจัดทำรูปถ่ายทางอากาศที่ครอบคลุมพื้นที่กว้างประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร และสอดคล้องกับหลักวิชาการด้านการถ่ายภาพทางอากาศ

2.1.4.4 การตรวจสอบสถานที่ก่อสร้าง การใช้โดรนในการตรวจสอบสถานที่ก่อสร้างเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการเก็บข้อมูลและสื่อสารกับทีมงานโครงการ โดรนสามารถบันทึกภาพถ่ายทางอากาศและวิดีโอได้ ซึ่งสามารถส่งไปยังทีมงานโครงการได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ การได้รับข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้ทีมงานสามารถตรวจสอบความปลอดภัยในโครงการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว และสามารถติดตามความคืบหน้าของงานได้อย่างแม่นยำและไม่เกิดความล่าช้า การใช้โดรนในการตรวจสอบสถานที่ก่อสร้างช่วยให้บริษัทรับเหมาก่อสร้างสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยช่วยในการจัดการเวลาและทรัพยากรให้เป็นไปได้ที่ดียิ่งขึ้น

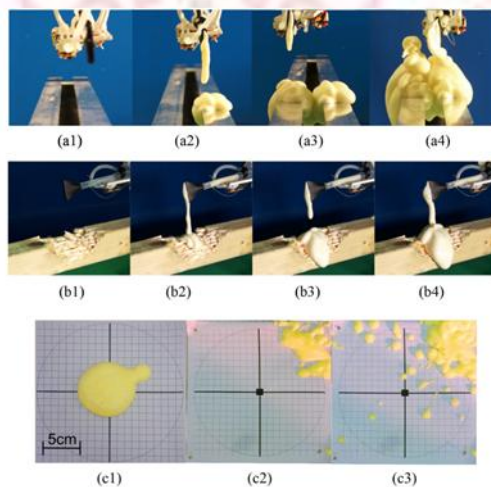
De Melo et al. [19] ได้ศึกษาและพัฒนาชุดขั้นตอนสำหรับการรวบรวม ประมวลผล และวิเคราะห์ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยในหน่วยงานก่อสร้าง โดยการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) สำหรับการรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายและวิดีโอ จากการศึกษาในโครงการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย 2 โครงการในประเทศบราซิล พบว่าข้อมูลภาพถ่ายและวิดีโอที่ได้จากโดรน สามารถให้รายละเอียดเชิงลึกเกี่ยวกับความปลอดภัยในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโดรนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการความปลอดภัยภายในโครงการก่อสร้างได้อย่างชัดเจน

दनัย เรืองสอน และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาและประเมินการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารโครงการก่อสร้างทางหลวง โดยเลือกโครงการก่อสร้าง 2 โครงการเป็นกรณีศึกษา ได้แก่ โครงการก่อสร้างสะพานมิตรภาพไทย-ลาว แห่งที่ 5 และโครงการก่อสร้างอาคารสำนักงานหน่วยบริหารและบำรุงรักษาสะพานมิตรภาพไทย-กัมพูชา การศึกษาใช้โดรนติดตั้งกล้องและอุปกรณ์สำรวจแบบดิจิทัลเพื่อบันทึกข้อมูลกิจกรรมและผลงานในโครงการ เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเก็บข้อมูลแบบเดิม ผลการศึกษาพบว่า โดรนขนาดเล็ก เช่น DJI MINI 2 มีความสะดวกรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพสูงในการเก็บข้อมูลกิจกรรมและความก้าวหน้าของ

โครงการ ในขณะที่โดรนขนาดใหญ่ เช่น DJI Matrice 200 series V2 ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง สามารถใช้ในการสำรวจปริมาณดินถล่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการสำรวจปริมาณดินถล่มอยู่ที่ร้อยละ 9.79

2.1.4.5 การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) มาใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากขนาดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มักมีขนาดใหญ่และสามารถติดตั้งในโรงงานหรือโรงกลึงเท่านั้น จึงทำให้เกิดความยุ่งยากในการขนย้ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในกรณีที่ต้องการใช้งานที่อื่นๆ ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติทางอากาศ (Aerial 3D printer) เพื่อใช้งานในสถานที่ยากต่อการเข้าถึงหรือพื้นที่จำกัด สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการพิมพ์และลดเวลาในกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นจะเห็นได้จากงานวิจัยที่พยายามชี้ให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับมาใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตัวอย่างเช่น

Graham Hunt et al. [21] ได้ออกแบบเครื่องพิมพ์ 3 มิติทางอากาศ (Aerial 3D printer) ที่สามารถพิมพ์โพลียูรีเทนโฟม โดยใช้โดรน Quadcopter (โดรนที่มีใบพัด 4 ตัว) พร้อมโมดูลการพิมพ์ในตัว ในการทดลองนี้ใช้คานอลูมิเนียมแขวนสองอันที่มีความกว้าง 25 มิลลิเมตร และช่องว่างอากาศขนาด 18 มิลลิเมตร โดยการทดลองใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติทางอากาศพิมพ์โฟมโพลียูรีเทนติดต่อกัน 5 ชั้น และนำไปทดสอบกับวัสดุโครงสร้างไม้ ซึ่งแสดงในภาพที่ 2-2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุโฟมโพลียูรีเทนสามารถเชื่อมต่อกับคานอลูมิเนียมและคานไม้ได้อย่างแน่นหนาและแข็งแรง ซึ่งบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้ดีของวัสดุและการออกแบบกลไกของเครื่องพิมพ์ 3 มิติทางอากาศ ต่อมาทางทีมวิจัยได้ทำการทดสอบโฟมโพลียูรีเทนกับเป้ากระต่ายเพื่อการพิมพ์ แสดงดังภาพที่ 2-2 (c1-c3) พบว่าลักษณะของโฟมที่ไม่มีความเสถียร ซึ่งได้รับผลกระทบจากลมที่เกิดจากใบพัดและความเสถียรในการบิน



ภาพที่ 2-2 การพิมพ์โพลียูรีเทนโฟมด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติทางอากาศ

ในปี 2015 โครงการ Muppette ที่จัดทำโดยสถาปนิก Gensler ใน Los Angeles ได้รับการพัฒนาเพื่อสำรวจขอบเขตของเทคโนโลยีและความสามารถในการใช้งาน โดยหนึ่งในผลงานสำคัญของโครงการคือการประยุกต์ใช้โดรนในการพิมพ์ 3 มิติ Jared Shier หนึ่งในผู้ก่อตั้งโครงการและนักพัฒนา โดรนพิมพ์ 3 มิติ ได้ให้สัมภาษณ์กับ BBC News ว่าเขากำลังพัฒนาโดรนที่สามารถขนส่งวัสดุเหมือนคอนกรีตได้ โดยมีเป้าหมายหลักของโครงการในการสร้างที่หลบภัยชั่วคราวที่สามารถช่วยเหลือผู้ประสบภัยได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัย โดรนในโครงการนี้ยังมีศักยภาพในการเข้าถึงพื้นที่ที่อันตรายหรือพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น การใช้โดรนในการสร้างที่พักชั่วคราวในกรณีที่สะพานถูกตัดขาด ซึ่งทำให้การขนส่งวัสดุและการก่อสร้างบ้านพักชั่วคราวเป็นไปได้ง่ายขึ้น โดรนพิมพ์ 3 มิติในโครงการสามารถสร้างที่พักชั่วคราวขนาด 6 ตารางเมตรภายในเวลาเพียง 1 วัน อย่างไรก็ตาม โดรนอาจมีข้อจำกัดเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกและความสามารถในการเติมวัสดุ ซึ่งในอนาคตคาดว่าโดรนอาจมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการยกและการขนถ่ายวัสดุ [22]

Ketao Zhang et al. [23] ได้ดำเนินการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการใช้หุ่นยนต์ทางอากาศ (Aerial-AM) สำหรับการพิมพ์วัสดุ 3 มิติ โดยมีแนวคิดสำคัญในการพัฒนาคือการใช้หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ในอากาศได้อย่างอิสระและมีความยืดหยุ่น เพื่อให้สามารถเข้าถึงพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ หุ่นยนต์ทางอากาศถูกออกแบบมาเพื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการและทำการพิมพ์วัสดุโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ที่ได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมกับการทำงานในอากาศ ในงานวิจัยนี้ นอกจากการศึกษาและพัฒนาการพิมพ์วัสดุ 3 มิติโดยใช้หุ่นยนต์ทางอากาศแล้ว ยังมีการพัฒนาส่วนผสมซีเมนต์-โพลีเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อบริเวณต่อเนื่องเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความเร็วในการพิมพ์ การทดลองได้สร้างรูปทรงกระบอกสูง 2.05 เมตร โดยใช้วัสดุโพลิเมอร์ที่แข็งตัวเร็วในการเชื่อมต่อกันจำนวน 72 ชั้น นอกจากนี้ยังสามารถพิมพ์รูปทรงกระบอกสูง 0.18 เมตร ซึ่งประกอบด้วยวัสดุผสมซีเมนต์-โพลีเมอร์ โดยมีโครงสร้าง 28 ชั้น ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า Aerial-AM สามารถพิมพ์วัสดุ 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้อย่างดี

2.2 คอนกรีตมวลเบาและวัสดุพอลิโพรไพลีน

2.2.1 คอนกรีตมวลเบา เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยมีน้ำหนักอยู่ในช่วง $300-1,850 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือลดน้ำหนักของอาคาร ส่งผลให้ลดต้นทุนโดยรวมในการก่อสร้างและยังช่วยลดต้นทุนของระบบขนส่งวัสดุในกระบวนการก่อสร้างด้วย นอกจากนี้คอนกรีตมวลเบายังมีความคงทนอยู่ในระดับที่ดี โดยคอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งประเภทตามวัสดุที่ใช้ในการผลิตออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

- 1) คอนกรีตมวลเบาจากการผสมมวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete) คือวัสดุก่อสร้างที่ผลิตโดยการนำมวลรวมที่มีความหนาแน่นต่ำหรือมีความพรุนสูงมาผสมในสัดส่วนที่เหมาะสม

โดยมวลรวมเบาที่ใช้สร้างคอนกรีตมวลเบามาจากธรรมชาติ เช่น Vermiculite, Perlite, Pumice และ Scoria ซึ่งเป็นลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติเมื่อถูกเขาไฟระเบิด

2) คอนกรีตมวลเบาจากการเติมฟองอากาศ (Aerated Concrete) โดยการแทนที่ซีเมนต์บางส่วนด้วยฟองอากาศ คอนกรีตมวลเบาจากการเติมฟองอากาศได้รับความนิยมอย่างสูงในแถบยุโรป ต่อมาได้มีการใช้งานในประเทศไทยในรูปของคอนกรีตบล็อกมวลเบา [24]

โดยลักษณะการใช้งานของคอนกรีตมวลเบาสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ คอนกรีตมวลเบาสำหรับงานที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Non-Structural Lightweight Concrete) ซึ่งมีหน่วยน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 300 ถึง 800 kg/m³ โดยมีวัตถุประสงค์สำหรับใช้ในงานประเภทฉนวนกันความร้อน เช่น ในการสร้างผนังฉนวนหรือฝ้าเพดานฉนวน ในส่วนของคอนกรีตมวลเบากำลังปานกลาง (Moderate Strength Concrete) ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 7 ถึง 17 MPa สามารถใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง เช่น ในการสร้างผนังหรือพื้นที่ที่ต้องรับน้ำหนักเล็กน้อย แต่ยังคงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ และคอนกรีตมวลเบาสำหรับงานโครงสร้าง (Structural Lightweight Concrete) โดยมีหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 1350 ถึง 1850 kg/m³ และมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 17 MPa เหมาะสำหรับใช้ในงานโครงสร้างที่ต้องรับน้ำหนักมากขึ้น เช่น ในการสร้างอาคารสูง เป็นต้น [25]

2.2.2 เถ้าลอย หรือเถ้าถ่านหิน (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash, PFA) เป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาถ่านหินเพื่อใช้เป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเถ้าถ่านหินจะถูกพัดออกมาตามปล่องของลมร้อน จากนั้นจะมีตัวดักจับไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) เพื่อไม่ให้เถ้าดังกล่าวลอยออกสู่บรรยากาศ จะรวบรวมเถ้าถ่านหินที่ลอยนี้เก็บไว้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยสามารถแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1) เถ้าลอยชนิด F คือ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) มีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีที่ผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃, และ Fe₂O₃ มีค่ามากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก

2) เถ้าลอยชนิด C คือ เถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) จะมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีที่ผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃, และ Fe₂O₃ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก [26]

โดยเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสานประเภทหนึ่งที่สามารถใช้เป็นส่วนผสมหรือแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต ซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งในสภาวะสดและเมื่อคอนกรีตแข็งตัวแล้ว เถ้าลอยมีการใช้งานในคอนกรีตมากกว่างานประเภทอื่นเนื่องจากเหตุผลสองประการดังนี้

1) ปฏิกริยาปอซโซลาน: เถ้าลอยมีออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อะลูมินา (Al_2O_3) และ เหล็ก (Fe_2O_3) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี การปฏิกริยานี้ช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต เมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้การผสมเถ้าลอยยังช่วยเพิ่มความ คงทนของคอนกรีต เนื่องจากลดความสามารถในการซึมผ่านและทำให้คอนกรีตทนต่อการกัดกร่อนได้ ดีขึ้น [27]

2) การเติมเต็มช่องว่างและการลื่นไหล: เถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กละเอียดและเป็นเม็ด กลม ซึ่งเมื่อผสมในคอนกรีตจะเข้าไปแทรกในช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์ หยาบ และหิน การที่ เถ้าลอยเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างเหล่านี้จะทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น นอกจากนี้ การที่เถ้าลอยมีรูปร่าง กลมยังช่วยให้คอนกรีตมีการลื่นไหลได้ดีขึ้น ทำให้การเทหรือปั๊มคอนกรีตลงในแบบสะดวกขึ้น ลดการ เยิ้ม (Bleeding) และการแยกตัวของคอนกรีต

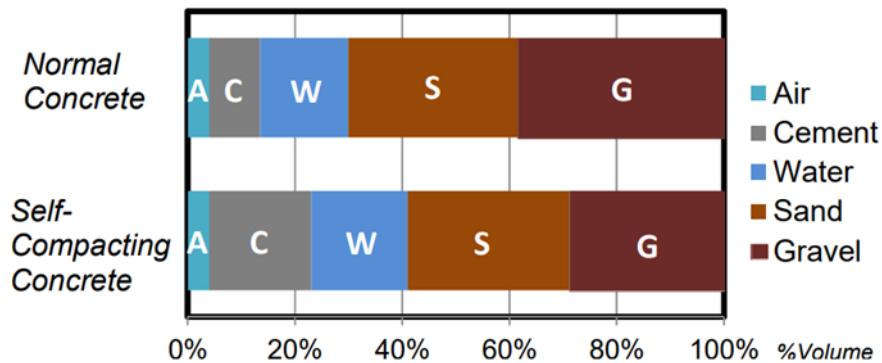
นอกจากนี้ การใช้เถ้าลอยคุณภาพดีที่มีความละเอียดสูงและปริมาณคาร์บอนต่ำยังช่วยลดความ ต้องการน้ำของคอนกรีต โดยการใช้เถ้าลอยประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน ทั้งหมดสามารถลดความต้องการน้ำลงได้น้อย 3% [28]

2.3 คอนกรีตไหลเข้าแบบง่าย (Self-compacting concrete)

คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) หรือคอนกรีตสมรรถนะสูง ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1988 โดยทีมนักวิจัยจากประเทศญี่ปุ่น [29] จุดมุ่งหมายหลักในการ พัฒนาคอนกรีตชนิดนี้คือการแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพและความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตใน อนาคต ซึ่งเป็นผลจากการปฏิบัติงานคอนกรีตที่ไม่เหมาะสมของแรงงานที่มีคุณภาพไม่ดีและแนวโน้ม การขาดแคลนแรงงานที่มีคุณภาพในอนาคตในประเทศญี่ปุ่น โดยนักวิจัยญี่ปุ่นได้กำหนดความหมาย ของคอนกรีตสมรรถนะสูง (High-Performance Concrete) ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) ความสามารถในการไหลเข้าแบบได้เอง โดยคอนกรีตสดต้องมีความสามารถในการไหลเข้าสู่ องค์ประกอบต่าง ๆ ได้โดยไม่เกิดการแยกตัว (Segregation) หรือการเยิ้ม (Bleeding) โดย ไม่ต้องใช้การจี้เขย่า
- 2) คุณภาพในช่วงอายุต้น ๆ ต้องไม่มีปัญหาเรื่องรุกรานหรือการแตกร้าวเมื่อทำการแกะแบบ
- 3) ความทนทานเมื่อแข็งตัว โดยคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วต้องมีความทนทานสูง

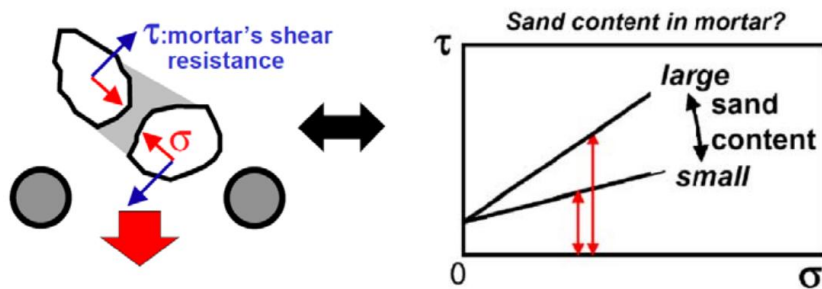
โดยความอัดแน่นที่สูงของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความแข็งแรงและ ทนทานมาก ซึ่งมีกำลังอัดประมาณ $700\text{--}800\text{ kg/cm}^2$ ซึ่งมีค่าสูงมากเนื่องจากการใช้ปริมาณซีเมนต์ที่ ค่อนข้างสูงในส่วนผสม นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมระหว่างคอนกรีตธรรมดาและ คอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง [30] แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตธรรมดาและ Self-Compacting Concrete [32]

ซึ่งปริมาณส่วนผสมที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างคอนกรีตธรรมดาและ Self-Compacting Concrete คือ ปริมาณซีเมนต์และปริมาณมวลรวมหยาบในส่วนผสม แสดงดังภาพที่ 2-3 Self-Compacting Concrete ต้องการปริมาณซีเมนต์ที่สูงในการทำปฏิกิริยากับสารลดน้ำ (Superplasticizer, Water Reducing Agent) เพื่อสร้างแรงผลักดันระหว่างอนุภาคซีเมนต์ที่จะทำให้คอนกรีตสามารถไหลได้ด้วยตัวเอง นอกจากนี้ปริมาณมวลรวมหยาบจำเป็นที่จะต้องจำกัดเนื่องจากปริมาณมวลรวมหยาบส่งผลอย่างชัดเจนต่อความสามารถในการไหลของคอนกรีต ปริมาตรมวลรวมหยาบที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง $0.28-0.31 \text{ m}^3/\text{คอนกรีต } 1 \text{ m}^3$ โดยขนาดมวลรวมหยาบที่ใหญ่ที่สุดควรมีค่าระหว่าง 20-25 มิลลิเมตร กำหนดโดย Japan Society of Civil Engineering (JSCE) [33]

ในทางทฤษฎี Self-Compacting Concrete ถูกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ มอร์ตาร์และมวลรวมหยาบ ซึ่งมอร์ตาร์จำเป็นต้องมีความสามารถในการไหลสูงเพื่อที่จะนำไปผสมกับมวลรวมหยาบแล้วได้ Self-Compacting Concrete เมื่อปริมาณมวลรวมหยาบถูกจำกัดแล้วความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณมวลรวมละเอียดเป็นหลัก แสดงดังภาพที่ 2-4 จะเห็นได้ว่าเมื่อคอนกรีตเสียรูประหว่างการไหล มอร์ตาร์จะถูกบีบอัดด้วยแรงเค้นตั้งฉากจากมวลรวมหยาบ (Normal stress, σ) ส่งผลให้ความต้านทานแรงเฉือนของมอร์ตาร์ (Shear resistance, τ) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 2-4 (ซ้าย) ทำให้ความสามารถในการไหลของคอนกรีตลดลง ความต้านทานแรงเฉือนของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับปริมาณมวลรวมละเอียดในส่วนผสม พิจารณาคอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมหยาบเท่ากัน แรงเค้นตั้งฉากที่เกิดขึ้นจะเท่ากัน ดังนั้นคอนกรีตที่มีปริมาณมวลรวมละเอียดมากกว่า จะมีความต้านทานแรงเฉือนมากกว่า ส่งผลให้ความสามารถในการไหลมีค่าน้อยกว่า แสดงดังภาพที่ 2-4 (ขวา) [32]



ภาพที่ 2-4 พฤติกรรมการไหลของ Self-Compacting Concrete [32]

ดังนั้น นอกจากการจำกัดปริมาณมวลรวมหยาบแล้ว ปริมาณมวลรวมละเอียดก็ต้องได้รับการควบคุมด้วย โดยอัตราส่วนระหว่างมวลรวมละเอียดต่อมอร์ตาร์ไม่ควรเกิน 45% โดยปริมาตร อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการไหลของคอนกรีตอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) คือ ปริมาณน้ำ การเพิ่มปริมาณน้ำทำให้คอนกรีตมีความเหลวมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้คอนกรีตไหลได้ดีขึ้น แต่หากปริมาณน้ำมากเกินไป ทำให้คอนกรีตเกิดการแยกตัว (Segregation) ระหว่างการไหลได้ ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่เหมาะสมซึ่งทำให้คอนกรีตสามารถไหลได้โดยไม่เกิดการแยกตัวควรมีค่าอยู่ระหว่าง 28-37% โดยน้ำหนัก ตามที่กำหนดโดย Japan Society of Civil Engineering (JSCE) [33]

2.3.1 ประเภทของ Self-Compacting Concrete (SCC) ในปัจจุบันสามารถจำแนกประเภท SCC ออกได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของส่วนผสมของคอนกรีต [32] ดังนี้

2.3.1.1 ประเภท Powder Based ใช้ปริมาณวัสดุประสาน เช่น ปูนซีเมนต์, วัสดุปอซโซลาน และวัสดุ filler ในปริมาณที่มากกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ เพื่อเพิ่มความหนืด (Viscosity) และความต้านทานการแยกตัวของมวลรวม (Segregation Resistance) ให้แก่คอนกรีต การใช้วัสดุประสานในปริมาณมากทำให้ต้องใช้สารเคมีลดน้ำ (Superplasticizer) ในปริมาณมากเพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง (Deformation) SCC ประเภทนี้มีความคงทน (Durability) สูงที่สุด เพราะสามารถให้กำลังอัดสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และปริมาณที่ใช้ มีความพรุนต่ำเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ แต่มีราคาค่อนข้างสูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเนื่องจากการใช้วัสดุประสานและสารเคมีลดน้ำในปริมาณมาก ข้อควรระวังของ SCC ประเภทนี้คือ ความสามารถในการไหล (Self-compatibility) มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและขนาดผลของมวลรวมละเอียด SCC ประเภทนี้เป็นต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในญี่ปุ่นและยังคงได้รับความนิยมในญี่ปุ่น รวมถึงประเทศไทยเองที่ก็นิยมใช้ SCC ประเภทนี้

2.3.1.2 ประเภท Viscosity Agent Based เป็นคอนกรีตที่ใช้สารเคมีประเภท Viscosity Agent เพื่อเพิ่มความหนืดให้แก่คอนกรีต ซึ่งช่วยลดความจำเป็นในการใช้ปริมาณวัสดุประสานมากๆ

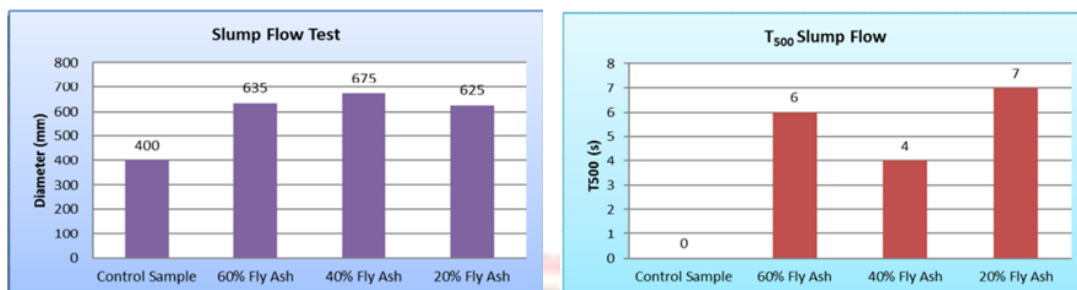
ในการผลิตคอนกรีต SCC ประเภทนี้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับคอนกรีตปกติทั่วไป ดังนั้น ความคงทนของคอนกรีตจึงไม่แตกต่างจากคอนกรีตทั่วไปมากนัก และราคาของ SCC ประเภทนี้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไปเพียงเล็กน้อย คอนกรีตประเภทนี้ได้รับความนิยมในสหรัฐอเมริกาและกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป

2.3.1.3 ประเภท Combination type เป็นคอนกรีตลูกผสมที่เกิดจากการรวมหลักการของคอนกรีตที่สามารถอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC) ทั้งสองประเภทที่กล่าวมาแล้ว คือ การใช้วัสดุประสาน (Binder) และสารปรับความหนืด (Viscosity Agent) จุดประสงค์ของประเภทนี้คือการลดความไวของ SCC ต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นและขนาดผลของมวลรวมละเอียด นอกจากนี้ ยังช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างราคาและความคงทนของคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม

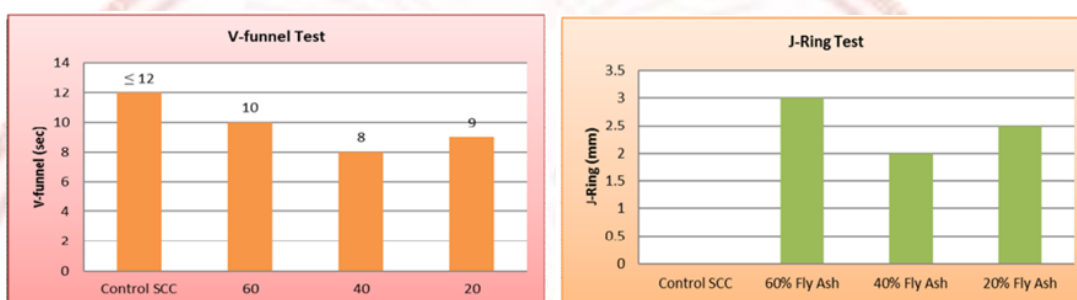
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตไหล (Self-compacting concrete)

Rafat Siddique [34] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตไหล (Self-Compacting Concrete, SCC) โดยการใช้เถ้าลอยชนิด F ในการวิจัยนี้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยในปริมาณรวม 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าลอยในช่วง 15-35% ของน้ำหนักวัสดุผสม มวลรวมหยาบคิดเป็น 39% ของปริมาตรคอนกรีต และมวลรวมละเอียดคิดเป็น 45% ของปริมาตรมอร์ต้า โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมระหว่าง 0.41 - 0.44 และใช้สารลดน้ำปริมาณสูงชนิด F ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตไหลที่มีการใช้เถ้าลอยสูงถึง 35% มีค่าการไหล (Slump Flow) อยู่ในช่วง 600-700 มิลลิเมตร โดยไม่เกิดการแยกตัว และระยะเวลาการไหลน้อยกว่า 4.5 วินาที ในด้านกำลังรับแรงอัด พบว่าการลดปริมาณเถ้าลอยจาก 35% เป็น 15% ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นถึง 18% ที่อายุ 28 วัน และ 40% ที่อายุ 365 วัน นอกจากนี้ การลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมยังทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน

Nur Royhaila Mohamad et al. [35] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของคอนกรีตที่สามารถอัดแน่นด้วยตัวเอง โดยใช้เถ้าลอย (Fly Ash) เป็นส่วนผสมในคอนกรีตที่สามารถอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) การศึกษาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 0%, 20%, 40% และ 60% โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมคงที่ 0.4 เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของคอนกรีตที่อัดแน่นด้วยตัวเอง โดยการทดสอบประกอบไปด้วยการไหลแผ่ (Slump Flow) เวลาที่ใช้ในการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร การทดสอบท่อรูปตัว V (V-Funnel) และ J-Ring ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 40% เป็นผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบความสามารถในการทำงาน แสดงดังภาพที่ 2-5 และ 2-6 เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดเพิ่มขึ้น ยกเว้นเถ้าลอยที่ 60%

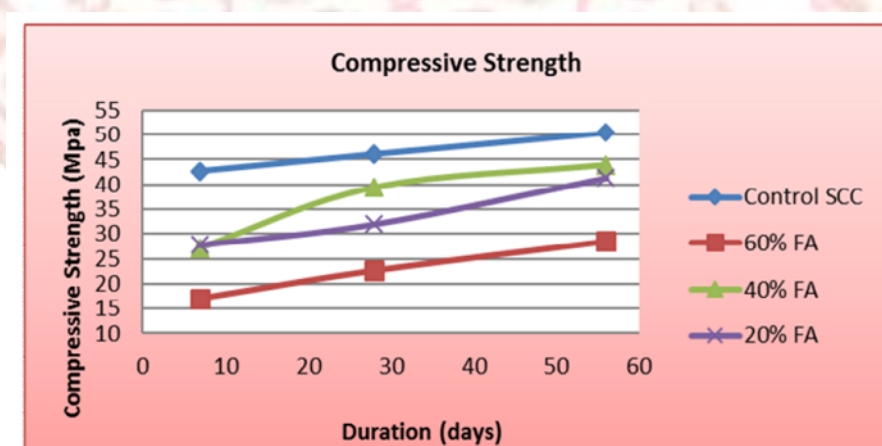


ภาพที่ 2-5 ผลการทดสอบ Slump Flow และ T_{500mm} Slump Flow กับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย



ภาพที่ 2-6 ผลการทดสอบ V-funnel และ J-ring กับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอย

หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลเพื่อกำหนดค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วน 40% ทำให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 27.2 MPa, 39.4 MPa และ 43.9 MPa ที่อายุ 7, 28 และ 56 วันตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง ซึ่งเห็นได้จากผลลัพธ์ที่ได้จากการผสมคอนกรีตที่มีเถ้าลอย 60% ซึ่งมีกำลังอัดต่ำที่สุดตามที่แสดงในภาพที่ 2-7

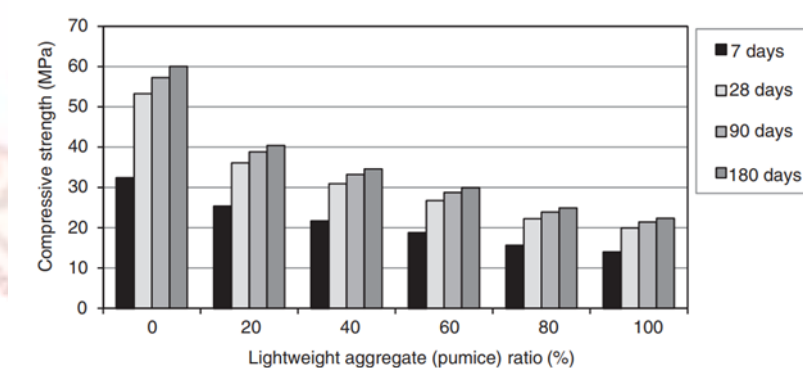


ภาพที่ 2-7 ผลการทดสอบกำลังอัดในช่วงอายุการบ่มที่ 7, 28 และ 56 วัน

Murat Kurt et al. [36] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยและหินภูเขาไฟ (Pumice) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตมวลเบาอัดตัวแน่น โดยใช้หินภูเขาไฟในอัตราส่วน 20%, 40%, 60%, 80%, และ 100% ของน้ำหนักซีเมนต์ พร้อมกับการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ในอัตราส่วน 40% ของน้ำหนักซีเมนต์ ในการศึกษาอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานถูกกำหนดไว้ที่ 0.30 ผลการศึกษาพบว่าเถ้าลอยช่วยหน่วงระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต เพิ่มความสามารถในการทำงานและกำลังรับแรงอัด แต่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงขณะที่การแยกตัวของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับปริมาณหินภูเขาไฟ การเพิ่มปริมาณหินภูเขาไฟช่วยลดหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต แต่ทำให้ความสามารถในการทำงานและความต้านทานรับแรงอัดลดลง จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสม FANP40 เป็นอัตราส่วนที่มีหน่วยน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ของคอนกรีตมวลเบา และสามารถผ่านการทดสอบ Slump Flow, L-Box, และ V-Funnel ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 นอกจากนี้ยังมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 30.9 MPa เมื่อบ่มที่อายุ 28 วัน

Mixtures		FANP100	FANP80	FANP60	FANP40	FANP20	FANP0
Flow diameter	mm	650	670	730	750	760	800
T50 flow time	s	8	7	4	4	3	2
V-funnel flow time	s	21	14	12	11	10	8
V-funnel time delayed 5 min	s	Blocked	20	16	14	11	9
L-box ratio	h_1/h_2	0.77	0.81	0.88	0.93	0.93	0.93
Unit weight of fresh concrete	kg/m^3	1357	1500	1712	1858	2074	2303
Ambient temperature	$^{\circ}\text{C}$	16	18	17	16	17	18

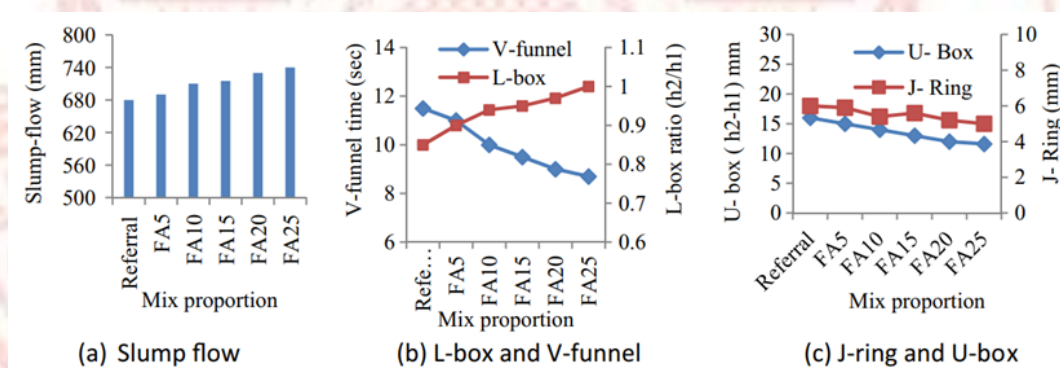
ภาพที่ 2-8 ผลการทดสอบ Slump flow, L-Box และ V funnel ตามมาตรฐาน EFNARC 2002



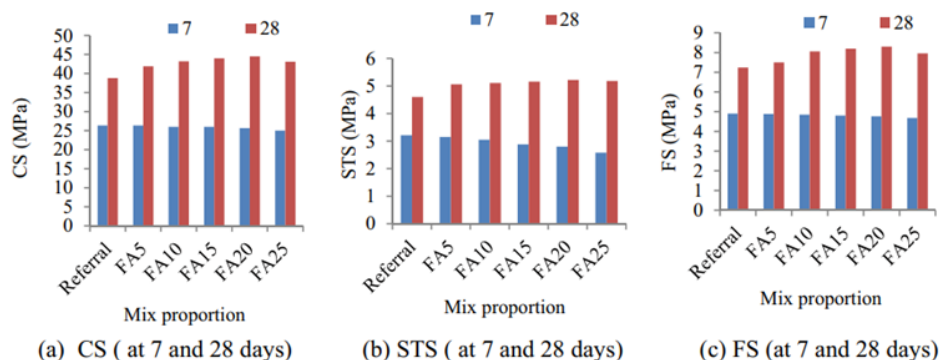
ภาพที่ 2-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนหินภูเขาไฟกับกำลังรับแรงอัด

Amrendra Singh et al. [37] ได้ทำการศึกษาคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) โดยการใช้วัสดุเหลือใช้แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ซึ่งพบว่าการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานในการผลิต SCC สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเติมเถ้าลอยในคอนกรีตช่วยเพิ่มทั้งความสามารถในการทำงานและความแข็งแรงของ

SCC ในการศึกษานี้ ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการใช้งานและความแข็งแรงของ SCC โดยมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.44 ปริมาณสารยึดเกาะทั้งหมด 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มวลรวมละเอียด 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มวลรวมหยาบ 828 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสารลดน้ำพิเศษ 5.85 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่ การทดสอบ Slump Flow, V-Funnel Flow Time, U-Box และ J-Ring โดยผลการทดสอบพบว่า ทุกอัตราส่วนมีค่า Slump Flow สูงกว่าเกณฑ์ ทำให้การไหลแผ่กระจายได้ดีขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย ส่วนผลการทดสอบ V-Funnel พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าเวลาการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ระหว่าง 6-12 วินาที โดยเวลาที่ไหลลดลงตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย การทดสอบ L-Box, U-Box และ J-Ring แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่ดีขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าลอย แสดงดังภาพที่ 2-10 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลแสดงดังภาพที่ 2-11 สรุปได้ว่า การใช้เถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ 20 และการบ่มคอนกรีตเป็นเวลา 28 วัน เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากคอนกรีตที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยในอัตราส่วนนี้มีค่ากำลังรับแรงอัด ค่าความต้านทานแรงดึง และค่ากำลังรับแรงดัด สูงกว่าสัดส่วนควบคุมถึง 15.51%, 13.47% และ 14.64% ตามลำดับ



ภาพที่ 2-10 ผลการทดสอบคอนกรีตไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเองกับปริมาณเถ้าลอย



ภาพที่ 2-11 ผลการทดสอบกำลังอัด ความต้านทานแรงดึง และกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตในช่วงอายุการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

Nadhim Abdulwahid Hamah Sor [38] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer, SP) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (Self-Compacting Lightweight Concrete, SCLC) ที่ผสมหินภูเขาไฟ (Pumice) โดยใช้ปริมาณ SP ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1%, 1.3%, 1.5%, 1.7%, และ 2% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ในการวิจัยนี้ ใช้ซีเมนต์และเถ้าลอยเป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยมีปริมาณคงที่ 550 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยเถ้าลอยคิดเป็น 20% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 0.26 โดยการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสดถูกดำเนินการตามมาตรฐาน EFNARC (2005) เช่น การทดสอบ Slump Flow, T_{500mm} Slump Flow, V-funnel และ L-box ratio โดยทำการบ่มคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณ SP ส่งผลให้ความสามารถในการไหลแผ่ของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนเวลาที่คอนกรีตไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 มิลลิเมตร และเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านอุปกรณ์กรวยรูปตัว V พบว่าปริมาณ SP ที่ 1.5% ทำให้คอนกรีตมีเวลาในการไหลเร็วที่สุด อีกทั้งมีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนได้ดีขึ้น จากการศึกษาสรุปได้ว่าการใช้ SP ในปริมาณ 1.5% ของน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสานเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการทำงานที่ดีและกำลังอัดสูงที่ 45.67 MPa

พงดนัย หวันทอก, ธีรวัฒน์ บุญมาปะ และมนพิดา กะณะศิริ [39] ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายที่ใช้ในงานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอยและซิลิกาฟูม รวมถึงสารผสมเพิ่มชนิดพิเศษ โดยใช้อัตราส่วนของซีเมนต์ต่อเถ้าลอยและซิลิกาฟูมในอัตราร้อยละ 20-30 และ 2-8 ตามลำดับ การวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติการทำงานของคอนกรีต ซึ่งรวมถึงการทดสอบการไหลแผ่ (Slump Flow), J-Ring, การเยิ้ม (Bleeding) และกำลังรับแรงอัดที่อายุคอนกรีต 28 วัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 20% และซิลิกาฟูม 8% พร้อมด้วยสารผสมเพิ่ม โดยมีผลการทดสอบด้านความสามารถในการทำงานที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 803.28 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน สรุปได้ว่าคอนกรีตไหลเข้าแบบง่ายที่ได้รับการพัฒนาโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน และการเติมสารผสมเพิ่ม มีความสามารถในการทำงานและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

Tommy Y Lo et al. [40] ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านการทำงานและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่ผสมด้วยมวลรวมเบา (Self-Compacting Lightweight Concrete: SCLC) เทียบกับคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองแบบทั่วไป ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ใช้สารยึดเกาะในปริมาณ 500-650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์และเถ้าลอย โดยการผสม SCLC และ SCC ใช้เถ้าลอยในอัตราร้อยละ 30 และ 50 ตามน้ำหนักของสารยึดเกาะทั้งหมด และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อสารยึดเกาะที่ 0.3 และ 0.4 ตามลำดับ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้มีการเติม

สารลดน้ำชนิดพิเศษและสารปรับปรุงความหนืด ผลการศึกษาพบว่า SCLC มีความสามารถในการทำงานและกำลังอัดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองแบบทั่วไป (SCC) โดย SCLC มีความหนาแน่นเพียง 75% ของ SCC และมีค่ากำลังอัดสูงสุดถึง 58 MPa ที่ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า SCLC ไม่เพียงแต่มีความสามารถในการใช้งานที่ดีและกำลังอัดสูง แต่ยังมีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการใช้งานในโครงสร้างที่ต้องการลดน้ำหนักโดยรวม



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C1157 [41] โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15

3.1.2 เถ้าลอย (Fly Ash, FA) ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้เถ้าลอยหินจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางโดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ และมีขนาดอนุภาคประมาณ 1-100 ไมโครเมตร มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.61 ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมีแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอย (FA) ที่ใช้ในการทดสอบ

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	LOI _{FA}
Fly Ash (FA)	31.85	15.89	14.07	26.76	2.45	0.17

โดยที่ LOI_{FA} คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากสารที่สามารถเผาไหม้ได้ของเถ้าลอย (%)

3.1.3 มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ในงานวิจัยที่ศึกษาครั้งนี้ ใช้มวลรวมละเอียดที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ขนาดช่องเปิด 2.36 มิลลิเมตร ค้างตะแกรงร่อนเบอร์ 40 ขนาดช่องเปิด 0.425 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.5 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.81 และการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.83 เปอร์เซ็นต์

3.1.4 มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate Concrete) มีหน่วยน้ำหนัก 732 kg/m³ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.25 และการดูดซึมน้ำเท่ากับ 16 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3-1 มวลรวมเบา

3.1.5 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixtures) ชนิดสารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer) ประเภท G ตามมาตรฐาน ASTM C494 [42] เป็นสารลดน้ำพิเศษชนิดหน่วงระยะเวลาการก่อตัว ทำให้มีเวลาในการทำงานมากขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถในการเทไหลเข้าแบบ (Workability) โดยกำลังอัดไม่สูญเสียไป

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การศึกษาคุณสมบัติทางด้านการไหลอัดแน่นด้วยตัวเองของคอนกรีตมวลเบา 2) การศึกษาความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วย โดรน 3) กรณีศึกษาเกี่ยวกับงานเทคอนกรีตด้วยโดรนของบ้านชั้นเดียวในสภาพการทำงานจริง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

การศึกษานี้เป็นการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตมวลรวมเบา ที่มีองค์ประกอบของเถ้าลอยและสารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านการไหลอัดแน่นด้วยตัวเองและคุณสมบัติเชิงกล โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- ชุดทดสอบ Slump Flow Test
- ชุดทดสอบ L-Box Test
- ชุดทดสอบ GTM Screen Stability Test
- เครื่องทดสอบระยะเวลาก่อตัวโดยใช้เข็มแบบไวแคต
- แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร
- แบบหล่อรูปทรงคาน ขนาด 100 x 100 x 350 มิลลิเมตร
- แบบหล่อรูปทรงคาน ขนาด 150 x 150 x 600 มิลลิเมตร
- เครื่องผสมคอนกรีตแบบ Hand Mixer
- โต๊ะสั่น (Vibrating Table)
- เครื่องทดสอบ 1500 KN-Universal Testing Machine (UTM)

3.3.1.2 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาส่วนนี้ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ปริมาณ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยกำหนดให้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.45 โดยใช้มวลรวมเบา (LWA) เป็นมวลรวมหยาบ ผสมร่วมกับมวลรวมละเอียดที่ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 8 ค้างตะแกรงร่อนเบอร์ 40 มีขนาด 0.425 ถึง 2.36 มิลลิเมตร ที่สัดส่วน 30% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

และใช้ปริมาณเถ้าลอยที่ 10% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ แปรผันปริมาณการเติมสารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer) type G ที่ 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) จากสัดส่วนผสมทั้งหมดที่กล่าวมาแสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สัดส่วนผสมคอนกรีต

Mix Proportions (kg/m ³)						
Name	Cement	Water	LWA	Fine Aggregates	FA	SP
C400_SP0	400	180	472	744	40	-
C400_SP5						22
C400_SP8						35
C400_SP10						44
C450_SP0	450	203	422	744	45	-
C450_SP5						25
C450_SP8						40
C450_SP10						50

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ “Ca_SPb”

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก

a หมายถึง ปริมาณปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (kg/m³)

SP หมายถึง สารลดน้ำปริมาณสูง (Superplasticizer) ชนิด G

b หมายถึง ปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงชนิด G (% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน)

3.3.1.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมสัดส่วนผสมคอนกรีต ตามตารางที่ 3-2 โดยผสมปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และมวลรวมให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมน้ำที่ผสมสารลดน้ำชนิด G (กรณีที่มีสารลดน้ำ) ในส่วนผสม จากนั้นผสมด้วยเครื่องผสมแบบ Hand Mixer เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันเป็นระยะเวลา 5 นาที เมื่อผ่านกระบวนการผสมเสร็จแล้วทำการทดสอบการไหลอัดแน่นด้วยตัวเองของคอนกรีตมวลเบาและบันทึกค่า จากนั้นเทเข้าแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร และแบบหล่อรูปทรงคานขนาด 100 x 100 x 350 มิลลิเมตร ไว้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัด จากนั้นนำไปสั่นบนโต๊ะ (Vibrating Table) เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อไล่ฟองอากาศให้เหลือน้อยที่สุด แล้วทำการชั่งน้ำหนักเพื่อหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสด หลังจากนั้นทำการหุ้มตัวอย่างทดสอบด้วยแผ่นพลาสติกทั้งแบบหล่อจนครบเวลา 24 ชั่วโมงในอุณหภูมิห้องเมื่อครบเวลาทำ

การแกะตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ แล้วหุ้มแผ่นพลาสติกทั้งตัวอย่างอีกรอบ จากนั้นทำการบ่มตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลต่อไป

3.3.1.4 วิธีการทดสอบ

3.3.1.4.1 การทดสอบการไหลอัดแน่นด้วยตัวเองของคอนกรีตมวลเบา งานวิจัยนี้ทำตามวิธีทดสอบคุณสมบัติความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตไหลตามมาตรฐาน European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete (EFNARC 2002) [43] โดยมีเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 3-3 และประกอบไปด้วยการทดสอบดังนี้

ตารางที่ 3-3 เกณฑ์ความสามารถการทำงานได้ของคอนกรีตไหลตามมาตรฐาน EFNARC (2002) [43]

Properties	Test Method	EFNARC (2002)		Units
		Max.	Min.	
Filling Ability	1. Slump Flow	650	800	mm
	2. Slump Flow at $T_{50\text{cm}}$	2	5	s
Passing Ability	3. L-Box Test	0.8	1.0	H_2/H_1
Segregation Resistance	4. GTM Screen Stability	5	15	%

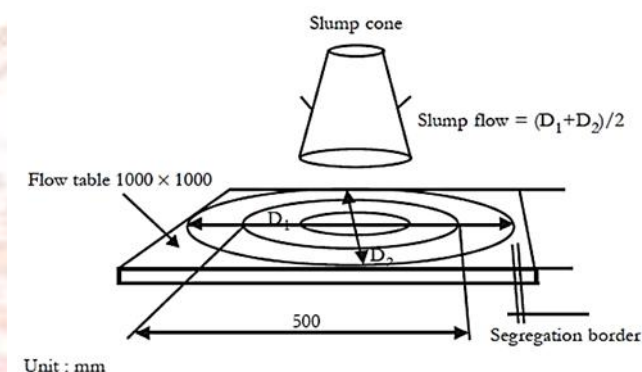
1) การทดสอบการไหลแผ่ (Slump Flow) และเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร ($T_{50\text{cm}}$ Slump Flow Test) การทดสอบความสามารถแทรกตัวและอัดแน่นในแบบหล่อ (Filling ability) ได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองโดยไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ โดยใช้ Slump cone ดังแสดงในภาพที่ 3-2 วางบนแผ่นเหล็กเดิมคอนกรีตจนเต็มโดยไม่ต้องทำการกระทุ้งให้แน่น จากนั้นทำการยกกรวยทดสอบขึ้นในแนวตั้ง โดยปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่อย่างอิสระ พร้อมกับเริ่มจับเวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นการไหลจนถึงการไหลแผ่ระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร ($T_{50\text{cm}}$ Slump flow test) ทำการบันทึกผล จากนั้นยังปล่อยให้คอนกรีตไหลแผ่ต่อไปจนหยุดไหล ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการแพร่กระจายใน 2 ทิศทาง เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะในการไหลแผ่สูงสุดของคอนกรีต (Slump flow) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Slump flow} = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3-1)$$

D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของการแผ่กระจายคอนกรีต

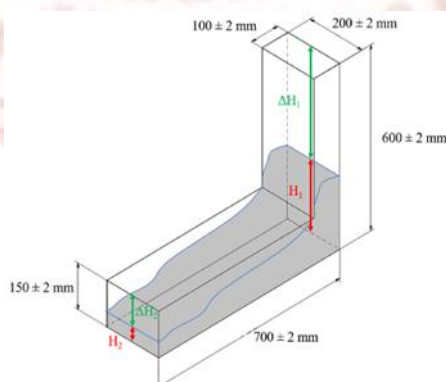
D_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางของการแผ่กระจายคอนกรีตที่ตั้งฉากกับ D_1

โดยตามเกณฑ์มาตรฐานยอมรับ EFNARC 2002 ค่าการไหลแผ่ (Slump Flow) ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 650 ถึง 800 มิลลิเมตร และค่าเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร ควรอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 วินาที ถ้าค่าการไหลแผ่ต่ำกว่า 650 มิลลิเมตร หรือค่าเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร สูงกว่า 5 วินาที นั้นหมายความว่าคอนกรีตมีความหนืดมากเกินไป ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการไหลและกระจายตัวของคอนกรีตไม่ดีพอ



ภาพที่ 3-2 การทดสอบการไหลแผ่และเวลาของการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 ซม.

2) การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-Box test) หลังจากกระบวนการผสมคอนกรีตเสร็จทำการทดสอบ L-Box test เป็นการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางที่มีมิติการไหลผ่านทั้งแนวตั้งและแนวนอน เริ่มจากการปิดแผ่นกั้นการไหลให้สนิท แล้วเทคอนกรีตมวลเบาจนเต็มกล่องในแนวตั้ง โดยไม่ต้องทำให้แน่นจากแรงภายนอก จากนั้นเปิดแผ่นกั้นให้คอนกรีตไหลผ่านซี่เหล็กทั้ง 3 เส้นอย่างอิสระจนหยุดไหล ดังแสดงในภาพที่ 3-3 และทำการวัดความสูงที่ระยะเริ่มต้นของกล่องแนวตั้ง (H_1) และระยะด้านปลายของกล่องในแนวนอน (H_2) แล้วนำมาคำนวณหาค่าอัตราส่วนของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางซึ่งเท่ากับ H_2/H_1 โดยตามเกณฑ์มาตรฐานยอมรับ EFNARC ปี 2002 การทดสอบ L-Box test มีค่าที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1 หากค่า L-Box test ต่ำกว่า 0.8 หมายความว่าคอนกรีตมีความหนืดมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีพอ



ภาพที่ 3-3 การทดสอบไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-Box test)

3) การทดสอบความต้านทานการแยกตัว (GTM screen stability test) เป็นทดสอบความต้านทานการแยกตัว (Segregation Resistance) โดยนำคอนกรีตผสมเสร็จใส่ถังที่มีฝาปิดพักไว้เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นเทตัวอย่างคอนกรีตภายในครั้งเดียวประมาณ 4.8 ± 0.2 กิโลกรัม ที่ระดับความสูง 50 เซนติเมตร ลงบนตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร ซึ่งวางอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 3-4 หลังจากนั้นจับเวลา 2 นาที แล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักหามวลของคอนกรีตที่ผ่านตะแกรง เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนการแยกตัว ได้ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนการแยกตัว (\%)} = \frac{M_b}{M_a} \times 100 \quad (3-2)$$

M_b คือ น้ำหนักของคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร

M_a คือ น้ำหนักของคอนกรีตทั้งหมดที่เทลงบนตะแกรงขนาด 5 มิลลิเมตร

เกณฑ์การพิจารณาผลการทดลองความต้านทานการแยกตัว เป็นดังนี้

>15% มีโอกาสเกิดการแยกตัวมาก

5-15% ความต้านทานการแยกตัวเป็นที่น่าพึงพอใจ

<5% ความต้านทานการแยกตัวมากเกินไป



ภาพที่ 3-4 การทดสอบความต้านทานการแยกตัว (GTM screen stability test)

3.3.1.4.2 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C138 [44] เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าน้ำหนักของคอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยไม่รวมช่องว่างภายในคอนกรีต เริ่มจากชั่งน้ำหนักแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร จากนั้นนำคอนกรีตสดบรรจุในแบบหล่อแล้วทำการชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาคำนวณค่าหน่วยน้ำหนัก ได้ดังนี้

$$\text{หน่วยน้ำหนักคอนกรีต (kg/m}^3\text{)} = \frac{W_C}{V_C} \quad (3-3)$$

W_C คือ น้ำหนักของคอนกรีตในแบบหล่อ

V_C คือ ปริมาตรของแบบหล่อ

3.3.1.4.3 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM C191 [45] ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ ทำให้ทราบถึงระยะเวลาที่ต้องทำงาน ไม่ว่าจะเป็นการผสม การลำเลียง การหล่อเข้าแบบ และการทำให้แน่นให้แล้วเสร็จก่อนที่จะซีเมนต์หรือคอนกรีตนั้นไม่คืนตัว และแข็งตัวในเวลาต่อมา ซึ่งการจำแนกระยะเวลาการก่อตัวซีเมนต์เพสต์ 2 ระยะคือ ระยะเวลาก่อตัวขั้นต้น (Initial setting time) เป็นระยะเวลาที่เข็มไวแคตขนาดมาตรฐาน 1 มิลลิเมตร จมในเนื้อเพสต์เป็นระยะ 25 มิลลิเมตร และระยะเวลาก่อตัวขั้นสุดท้าย (Final setting time) เป็นระยะเวลาที่เข็มไวแคตขนาดมาตรฐานไม่จมลงในเนื้อคอนกรีต โดยการทดสอบแสดงภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวแคต

3.3.1.4.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเอง

1) การทดสอบกำลังรับแรงอัด เมื่อผ่านกระบวนการผสมเสร็จตามสัดส่วนที่กล่าวในตารางที่ 3-2 จากนั้นในการทดสอบกำลังรับแรงอัดใช้ตัวอย่างทดสอบทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ในอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่องทดสอบ 1500 KN-Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในภาพที่ 3-6 ซึ่งการทดสอบกำลังรับแรงอัดเป็นไปตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4 [46] โดยคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำกว่า 18 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความอ่อนแอกเกินไป ไม่สามารถรับน้ำหนักหรือแรงกดต่าง ๆ จึงมีการกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตขั้นต่ำที่ 18 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 3-6 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

2) การทดสอบกำลังรับแรงดัด ใช้ตัวอย่างทดสอบรูปทรงคาน ขนาด $100 \times 100 \times 350$ มิลลิเมตร แล้วทำการบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ในอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่องทดสอบ 1500 KN-Universal Testing Machine (UTM) ดังแสดงในภาพที่ 3-7 ซึ่งการทดสอบกำลังรับแรงดัดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C78 [47]



ภาพที่ 3-7 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.3.2 การศึกษาความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

การศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ประสิทธิภาพการบินของโดรนโดยมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก 2) ผลกระทบของแรงลมต่อการเทคอนกรีตด้วยโดรน 3) ความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

3.3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- โดรน หรืออากาศยานไร้คนขับ แสดงดังรูปที่ 3-8 และตารางที่ 3-4

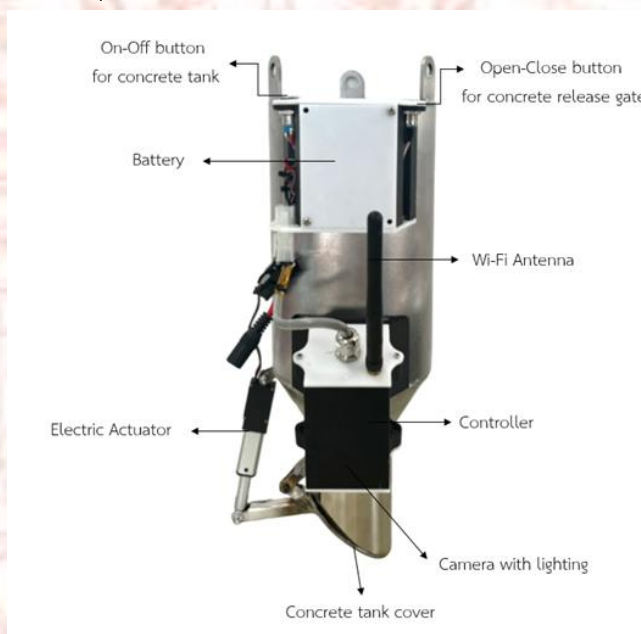


ภาพที่ 3-8 โดรนและอุปกรณ์ที่ใช้กับโดรน

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติการใช้งานและข้อมูลจำเพาะของโดรน (รายละเอียดในภาคผนวก ก)

Specifications of Drone		
Drone type	Heavy-lift Quadcopter UAV	
Wingspan dimensions (Width x Length x Height)	1,960 x 1,840 x 750	mm
Maximum payload capacity	20	kg
Flight time (without payload)	30	min/charge
Maximum control range	4	km
Lithium Polymer battery capacity	16,000	mAh
Battery energy per unit	710.4	Wh

- ถังบรรจุและเทคอนกรีตด้วยรีโมทคอนโทรล แสดงภาพที่ 3-9 และตารางที่ 3-5



ภาพที่ 3-9 ถังบรรจุและเทคอนกรีตด้วยรีโมทคอนโทรล

ตารางที่ 3-5 คุณสมบัติการใช้งานและข้อมูลจำเพาะของถังเทคอนกรีต (รายละเอียดในภาคผนวก ข)

Specification of The Concrete Pouring Tank		
Weight	2.7	kg
Height	350	mm
Diameter	120	mm
Concrete capacity with unit weight of 1,829 kg/m ³	5	kg
Signal transmission range of the tank	20	m
Battery capacity	2	A
Continuous operation time	8-10	hr

- วัดต์มิเตอร์ แสดงดังภาพที่ 3-10 สามารถวัดค่าพลังงานที่ใช้จากแบตเตอรี่ของโดรน ในหน่วย วัดต์-ชั่วโมง



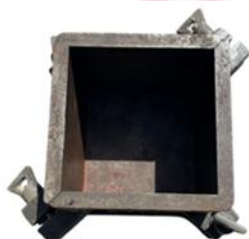
ภาพที่ 3-10 วัดต์มิเตอร์

- มาตรวัดความเร็วลม แสดงดังภาพที่ 3-11 สามารถใช้วัดทั้งความเร็วลมและอุณหภูมิได้ โดยมีช่วงการวัดความเร็วลมตั้งแต่ 0 ถึง 30 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 3-11 มาตรวัดอัตราเร็วของลม

- แบบเหล็กสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน แสดงดังภาพที่ 3-12 (a) แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 150 x 150 x 150 มิลลิเมตร (b) แบบหล่อนานขนาด 100 x 100 x 350 มิลลิเมตร (c) แบบหล่อนานซ่อมแซมขนาด 150 x 75 x 200 มิลลิเมตร และเสริมเหล็กขนาด 9 มิลลิเมตร โดยมีระยะห่างของเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 3-12 แบบหล่อนานขนาดต่างๆ ในการเทคอนกรีตด้วยโดรน (a) แบบหล่อลูกบาศก์ (b) แบบหล่อนาน (c) แบบหล่อนานซ่อมแซม

- กรวยรองรับคอนกรีต โดยปากกรวยด้านบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 450 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างขนาด 100 มิลลิเมตร แสดงในภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 กรวยรองรับคอนกรีตจากการเทคอนกรีตด้วยโดรน

3.3.2.2 คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

สัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่ใช้ในการทดสอบนี้ ได้จากการทดลองในส่วนที่ 1 โดยมีสมบัติผ่านตามเกณฑ์ของ EFNARC (2002) และมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 18 เมกะปาสคาล เพื่อให้เหมาะสำหรับงานโครงสร้าง

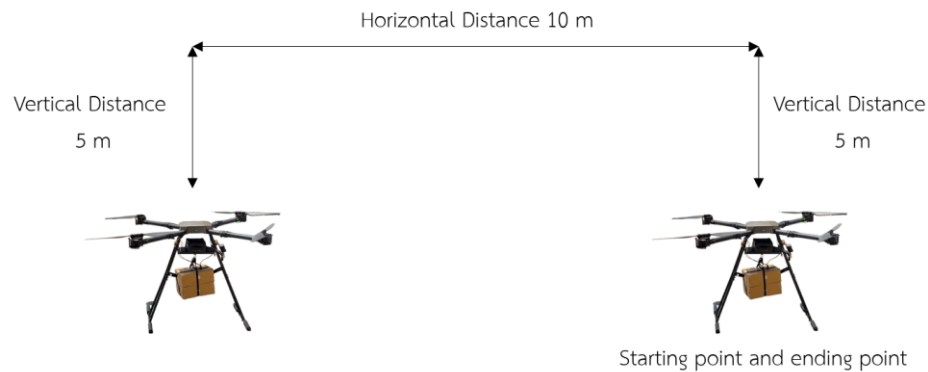
3.3.2.3 การทดลอง

3.3.2.3.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบินของโดรน

ในการทดสอบการบินของโดรน โดยให้โดรนบินขึ้นที่ความสูง 5 เมตร จากนั้นบินในแนวราบไปข้างหน้าเป็นระยะทาง 10 เมตร และบินกลับมาที่จุดเริ่มต้น พร้อมกับบันทึกเวลาในการเคลื่อนที่ของโดรน การทดสอบนี้ดำเนินการภายใต้ 2 สภาวะ ดังนี้

- 1) สภาวะมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก : โดรนแบกน้ำหนักบรรทุก 8 กิโลกรัม และไม่มีการแบกน้ำหนักบรรทุก โดยโดรนบินไปยังเป้าหมายและเดินทางกลับ แสดงดังภาพที่ 3-14
- 2) สภาวะมีการเทคอนกรีตในสนามจริง : โดรนเทคอนกรีตที่น้ำหนักบรรทุกคอนกรีต 4 กิโลกรัม โดยโดรนบินไปยังเป้าหมายพร้อมทำการเทคอนกรีตและเดินทางกลับ แสดงดังภาพที่ 3-15

หลังจากการบินเสร็จสิ้นในแต่ละกรณี ทำการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ โดยติดตั้งเครื่องวัดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้ากับโดรน ซึ่งเครื่องวัดนี้สามารถตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าในหน่วยวัตต์จากแบตเตอรี่ของโดรน ช่วยให้สามารถประเมินปริมาณพลังงานที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้ง นอกจากนี้การทดสอบยังทำให้ทราบระยะเวลาการบินและอัตราเร็วในการบินของโดรนในแต่ละครั้ง



ภาพที่ 3-14 ทิศทางการบินโดรนโดยมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก



ภาพที่ 3-15 ทิศทางการบินโดรนโดยมีการเทคอนกรีตด้วยโดรน

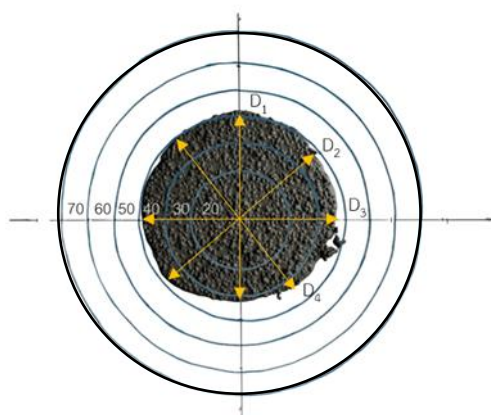
3.3.2.3.2 การศึกษาผลกระทบแรงลมขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการและในสนามจริง

การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของแรงลมขณะเทคอนกรีตด้วยโดรนเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากแรงลมทำให้คอนกรีตที่ปล่อยออกจากโดรนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ หรือถูกพัดออกจากพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบ 2 สภาพแวดล้อมหลักดังนี้

- 1) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้จำลองสภาพแวดล้อมด้วยการใช้พัดลมขนาดใหญ่ที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วลม เพื่อประเมินผลกระทบของแรงลมในช่วง 0-2, 2-4 และ 4-6 เมตรต่อวินาที โดยได้ทำการเทคอนกรีตจากความสูง 20, 40 และ 60 เซนติเมตร ลงบนแผ่นที่มีรัศมีวงกลมเพื่อสังเกตการกระจายตัวของคอนกรีต จากนั้นทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัว

ในแต่ละทิศทางรวม 4 ค่า โดยวัดทำมุม 0° , 90° และ 45° ตามที่แสดงในภาพที่ 3-16 จากนั้นจึงนำค่าที่วัดได้ทั้งหมดมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการแผ่กระจายคอนกรีต

2) ในการทดสอบภาคสนาม ได้ทำการทดลองเทคอนกรีตในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อตรวจสอบผลกระทบของแรงลมต่อการกระจายตัวและคุณภาพของคอนกรีต โดยเริ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วลมเพื่อบันทึกความเร็วลมในขณะทำการทดสอบ หลังจากนั้นได้ทำการเทคอนกรีตจากความสูง 20, 40 และ 60 เซนติเมตร ลงบนแผ่นที่มีรัศมีวงกลม จากนั้นจึงวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัวของคอนกรีตในแต่ละทิศทางรวม 4 ค่า โดยวัดทำมุม 0° , 90° และ 45° ตามที่แสดงในภาพที่ 3-16 จากนั้นจึงนำค่าที่วัดได้ทั้งหมดมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการแผ่กระจายคอนกรีต



ภาพที่ 3-16 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของคอนกรีต

3.3.2.3.3 การศึกษาความสามารถเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

การทดสอบความสามารถในการเทคอนกรีตด้วยโดรน ทำการบินโดรนขึ้นที่ความสูง 5 เมตร และบินในแนวราบไปข้างหน้าเป็นระยะทาง 10 เมตร แล้วบินกลับมาที่จุดเริ่มต้น แสดงดังภาพที่ 3-15 การทดสอบนี้ประกอบไปด้วยการทดสอบการเทตัวอย่างทดสอบ 3 รูปแบบ ได้แก่ ลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร คานขนาด $100 \times 100 \times 350$ มิลลิเมตร และการเทคอนกรีตเพื่องานซ่อมแซมบนคานขนาด $150 \times 75 \times 200$ มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การเทคอนกรีตด้วยโดรนของแบบหล่อลูกบาศก์

การเทคอนกรีตในแต่ละรอบมีน้ำหนักบรรทุก 3 กิโลกรัม โดยจำนวนรอบของการเทคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 รอบ ตามปริมาตรของแบบหล่อลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร ตามตารางที่ 3-6 เพื่อจำลองการเทคอนกรีตด้วยโดรน หลังจากนั้นทำการบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ในอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4 [46] เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรนกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ

2) การเทคอนกรีตด้วยโดรนของแบบหล่อคาน

การเทคอนกรีตในแต่ละรอบมีน้ำหนักบรรทุกทุก 4 กิโลกรัม โดยจำนวนรอบของการเทคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 รอบ ตามปริมาตรของแบบหล่อคานขนาด $100 \times 100 \times 350$ มิลลิเมตร ตามตารางที่ 3-6 หลังจากนั้นทำการบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ในอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C78 [47] เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรนกับในรูปแบบปกติ

3) การเทคอนกรีตด้วยโดรนของคานซ่อมแซม

การเทคอนกรีตในแต่ละรอบมีน้ำหนักบรรทุกทุก 3 กิโลกรัม โดยจำนวนรอบของการเทคอนกรีตแบ่งออกเป็น 2 รอบ ตามปริมาตรของแบบหล่อขนาด $150 \times 75 \times 200$ มิลลิเมตร และมีการใส่เหล็กเสริมคานขนาด 9 มิลลิเมตร ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร เพื่อจำลองการเทคอนกรีตด้วยโดรนผ่านเหล็กเสริม จากนั้นทำการเทคอนกรีตลงแบบคานขนาด $150 \times 150 \times 600$ มิลลิเมตร แล้วเว้นตรงกึ่งกลางคานขนาด $150 \times 75 \times 200$ มิลลิเมตร เพื่อการจำลองสภาพพื้นผิวชำรุดก่อนทำการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบซ่อมแซม ตามตารางที่ 3-6 หลังจากนั้นทำการบ่มที่อายุการทดสอบ 28 วัน ในอุณหภูมิห้อง แล้วนำมาทดสอบกำลังรับแรงดัด ตามมาตรฐาน ASTM C78 [47] เพื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรนกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ

ตารางที่ 3-6 การทดสอบการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยใช้จู่ดรองรับคอนกรีต

Mix \ Testing	Mold	Load Weight (kg)	The Number of Pouring Rounds
Meets the EFNARC (2002) standards and a minimum compressive strength of 18 MPa	Cube $150 \times 150 \times 150$ mm	3	2
	Beam $100 \times 100 \times 350$ mm	4	2
	Repair Beam $150 \times 75 \times 200$ mm	3	2

3.3.3 กรณีศึกษาการเทคอนกรีตด้วยโดรนของบ้านชั้นเดียวในสภาพการทำงานจริง

ในการศึกษานี้มีการคัดเลือกแบบบ้านที่มีขนาดและรูปทรงที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการเทคอนกรีตด้วยโดรน โดยเลือกบ้านที่มีโครงสร้างพื้นฐานสามารถจำลองสภาพการทำงานได้อย่างใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง การจำลองนี้ครอบคลุมถึงการกำหนดพื้นที่สำหรับการเทคอนกรีตระยะทางที่โดรนเคลื่อนที่ ระยะเวลาการปฏิบัติงาน และอัตราการใช้พลังงาน โดยสถานการณ์ต่าง ๆ

ถูกออกแบบให้สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริง เพื่อให้ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้ปรับปรุงและประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยการจำลองสถานการณ์เกิดจากเงื่อนไขของพื้นที่การก่อสร้างที่ตั้งอยู่ในชุมชนแออัด โดยรถเทคอนกรีตไม่สามารถเข้าไปได้ ซึ่งในสถานการณ์นี้การใช้โดรนลำเลียงและเทคอนกรีตจึงกลายเป็นหนึ่งในทางเลือกที่นำมาพิจารณาประยุกต์ใช้ ซึ่งมีกำหนดรายละเอียดในการเทคอนกรีตด้วยโดรนดังนี้

- 1) จุดเตรียมวัสดุคอนกรีต เป็นจุดเริ่มต้นที่มีการจัดเก็บและเตรียมคอนกรีตสำหรับการก่อสร้าง โดยตั้งอยู่ห่างจากตำแหน่งบ้านที่ทำการเทคอนกรีตประมาณ 50 เมตร
- 2) ระยะทางการบินของโดรนในการขนส่งคอนกรีตจากจุดเตรียมวัสดุไปยังตำแหน่งบ้านมีระยะทาง 50 เมตร โดยบินที่ระดับความสูง 5 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง
- 3) น้ำหนักบรรทุกในการเทคอนกรีตด้วยโดรนครั้งละ 15 กิโลกรัม เนื่องจากโดรนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้สามารถบรรทุกคอนกรีตได้สูงสุดที่น้ำหนัก 20 กิโลกรัม



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

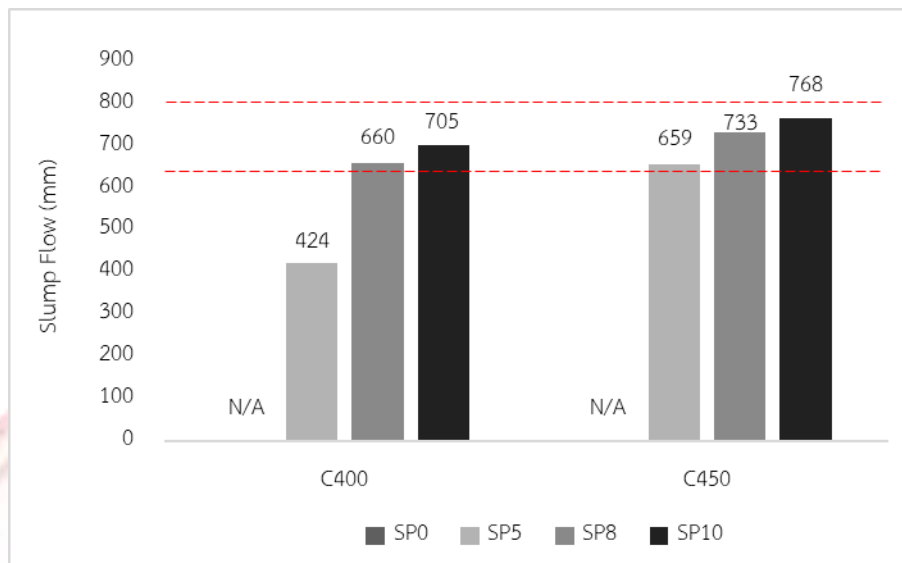
4.1 ผลศึกษาคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่เหมาะสมสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน

การทดสอบได้ศึกษาผลของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในปริมาณ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแปรผันสารลดน้ำปริมาณสูง type G ที่ 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้ ค่าการทดสอบการไหลแผ่และเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร ความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวาง ความสามารถต้านทานการแยกตัว ค่าหน่วยน้ำหนัก ระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวแคต รวมถึงการทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดัด

4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการไหลของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

4.1.1.1 การทดสอบการไหลแผ่ (Slump Flow) และเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร (T_{50cm} Slump Flow Test)

จากภาพที่ 4-1 พบว่าค่าการไหลแผ่ของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงในสัดส่วนผสม เนื่องจากสารลดน้ำปริมาณสูงทำให้อนุภาคของวัสดุมีประจุไฟฟ้าเดียวกันและองค์ประกอบของพอลิเมอร์เป็นตัวหล่อลื่น ทำให้อนุภาควัสดุกระจายตัวกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการไหลได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มีแนวโน้มที่ปรับปรุงความสามารถในการไหลของส่วนผสมคอนกรีตโดยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาค สามารถหล่อลื่นอนุภาคมวลรวมได้ดีขึ้น ช่วยให้การไหลราบรื่นขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนผสมปริมาณปูนซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ไม่มีการใส่สารลดน้ำปริมาณสูง (SP0) ซึ่งผลปรากฏว่าไม่มีการไหลแผ่ และสัดส่วนผสมที่มีค่าการไหลแผ่มากที่สุดคือ ปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 10% มีค่าเท่ากับ 768 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาเกณฑ์การไหลแผ่ตามมาตรฐานคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่กำหนด โดยตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 (650 ถึง 800 มิลลิเมตร) ประกอบด้วยสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 8% และ 10% รวมถึงสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 5%, 8% และ 10% หากค่าการไหลแผ่ที่ต่ำกว่า 650 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมีความหนืดมากเกินไป ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อความสามารถในการไหลและการกระจายตัวของคอนกรีตไม่ดีพอ



ภาพที่ 4-1 ค่าการไหลแผ่

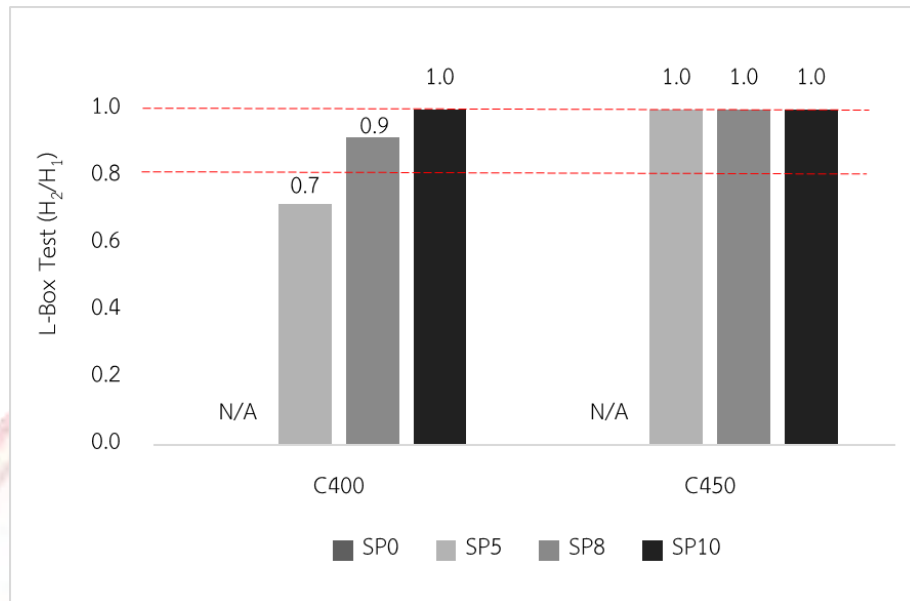
จากภาพที่ 4-2 พบว่าเวลาการไหลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูง เช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการไหลของวัสดุได้ ทำให้เวลาการไหลเร็วขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนผสมปริมาณปูนซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ไม่มีการใส่สารลดน้ำปริมาณสูง (SP0) ซึ่งผลปรากฏว่าการไหลแผ่ไม่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร และสัดส่วนผสมที่มีค่าเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร น้อยที่สุดคือ C450_SP10 มีค่าเท่ากับ 2.8 วินาที เมื่อพิจารณาเกณฑ์เวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร ตามมาตรฐานคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่กำหนด โดยตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 (2 ถึง 5 วินาที) ประกอบด้วยสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 8% และ 10% รวมถึงสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 5%, 8% และ 10% หากเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร มีค่าสูงกว่า 5 วินาที นั้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมีความหนืดมากเกินไป ซึ่งสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อความสามารถในการไหลและการกระจายตัวของคอนกรีตที่ไม่ดีพอ



ภาพที่ 4-2 ค่าเวลาการไหลผ่านถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร

4.1.1.2 การทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-Box test)

จากภาพที่ 4-3 พบว่าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางดีขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใส่สารลดน้ำปริมาณสูงทำให้คอนกรีตมีการไหลที่ดี ส่งผลให้สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีและเต็มเต็มช่องว่างได้ดี ส่วนการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีตสามารถช่วยปรับปรุงความสามารถในการไหลดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปูนซีเมนต์ช่วยให้ความสมดุลของส่วนผสมดีขึ้น คือปูนและน้ำมีการผสมเข้าด้วยกันในสัดส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้การไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดี นอกจากนี้ สัดส่วนผสมปริมาณปูนซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ไม่มีการใส่สารลดน้ำปริมาณสูง (SP0) ซึ่งผลปรากฏว่าไม่สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนได้ เมื่อพิจารณาเกณฑ์ค่าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน ตามมาตรฐานคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยเองที่กำหนด โดยตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 (0.8 ถึง 1) ประกอบด้วยสัดส่วนปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 8% และ 10% หากค่า L-Box test ของคอนกรีตต่ำกว่า 0.8 หมายความว่าคอนกรีตมีความหนืดมากเกินไป ซึ่งทำให้ไม่สามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ดีพอ



ภาพที่ 4-3 ค่าการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน

4.1.1.3 การทดสอบความต้านทานการแยกตัว (GTM screen stability test)

จากภาพที่ 4-4 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนการแยกตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงที่เพิ่มขึ้นในสัดส่วนผสม เนื่องจากการใส่สารลดน้ำปริมาณสูงมากเกินไปทำให้คอนกรีตมีความเหลวมากและนำไปสู่การเกิดการแยกตัวของคอนกรีต การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มีแนวโน้มทำให้อัตราการแยกตัวสูงขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มความไหลื่นของคอนกรีต ส่งผลให้เนื้อเพสต์ไหลผ่านตะแกรงในการทดสอบความต้านทานการแยกตัวได้มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้อัตราการแยกตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สัดส่วนผสมปริมาณปูนซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ไม่มีการใส่สารลดน้ำปริมาณสูง (SP0) ซึ่งผลปรากฏว่าไม่สามารถทดสอบได้ เพราะคอนกรีตมีความหนืดและแห้งจนเกินไป เมื่อพิจารณาเกณฑ์ค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนการแยกตัว ตามมาตรฐานคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยเองที่กำหนด โดยตัวอย่างที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 (5% ถึง 15%) ประกอบไปด้วยสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 8% และ 10% รวมถึงสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 5% ถ้าเปอร์เซ็นต์ของคอนกรีตที่ผ่านตะแกรงหรืออัตราส่วนการแยกตัวอยู่ระหว่าง 5% ถึง 15% ของน้ำหนักคอนกรีต ความต้านทานการแยกตัวถือว่าเป็นน่าพอใจ แต่ถ้าต่ำกว่า 5% ความต้านทานการแยกตัวมากเกินไป มีแนวโน้มที่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวสำเร็จ และกรณีที่สูงกว่า 15% โดยเฉพาะอย่างยิ่งสูงกว่า 30% มีโอกาสเกิดการแยกตัวมาก

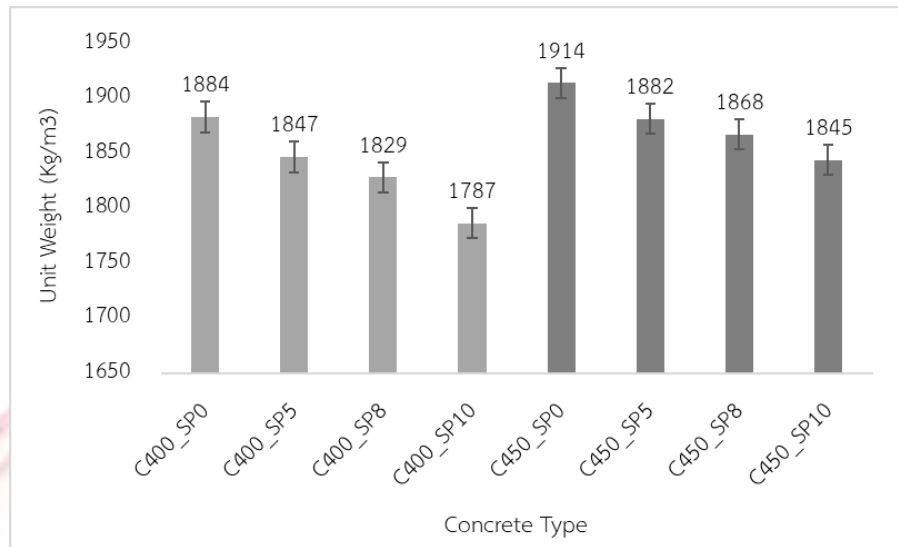


ภาพที่ 4-4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความต้านทานการแยกตัว

4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

4.1.2.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีต (Unit Weight)

จากภาพที่ 4-5 การทดสอบหาค่าน้ำหนักของคอนกรีตในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยไม่รวมช่องว่างภายในคอนกรีต จากปริมาณซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแปรผันสารลดน้ำปริมาณสูง type G ที่ 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูง type G ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจน ทั้งในกรณีของปริมาณซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากการใส่สารลดน้ำมากเกินไป ทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีช่องว่างมากและความหนาแน่นลดลง ส่งผลให้ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลงตามไปด้วย โดยค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองในงานวิจัยนี้มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำสุดเท่ากับ 1,787 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 1,914 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าหน่วยน้ำหนักนี้เกิดจากการใส่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์มีความถ่วงจำเพาะมากที่สุดในสัดส่วนผสม

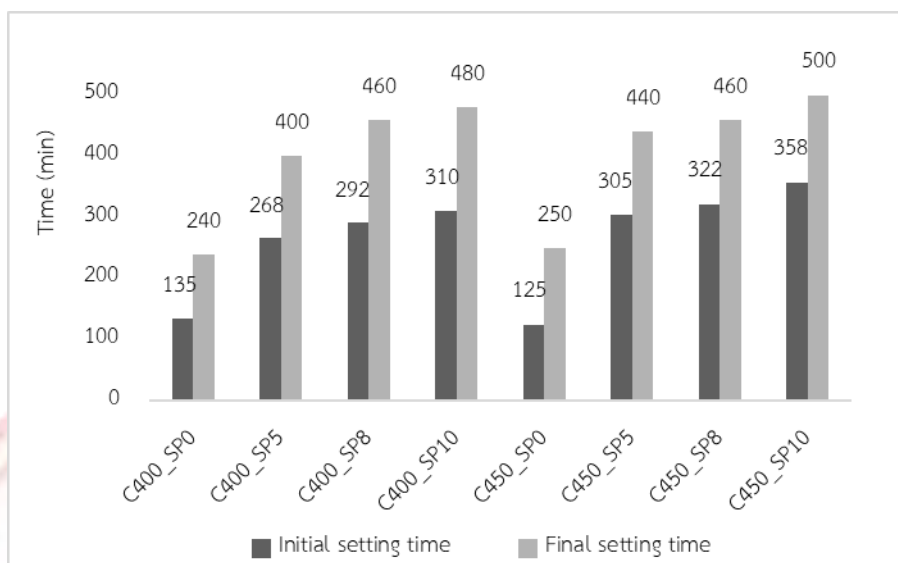


ภาพที่ 4-5 ค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีต

4.1.2.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยเข็มไวแคต (Setting Time)

จากภาพที่ 4-6 จากปริมาณซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแปรผันสารลดน้ำปริมาณสูง type G ที่ 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาในการทำงานขึ้นอยู่กับปริมาณสารลดน้ำในสัดส่วนผสม สำหรับตัวอย่างคอนกรีตประเภท C400_SP0 ซึ่งไม่มีการเติมสารลดน้ำเลย (0%) พบว่ามีระยะเวลาในการทำงานน้อยที่สุด โดยระยะเวลาการก่อตัวสิ้นสุดอยู่ที่ 240 นาที ขณะที่ตัวอย่างคอนกรีตประเภท C450_SP10 ซึ่งมีปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงในอัตราส่วนสูงสุด (10%) มีระยะเวลาการก่อตัวสิ้นสุดที่ยาวนานที่สุดถึง 500 นาที

ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณสารลดน้ำชนิด Type G ในสัดส่วนผสม ส่งผลให้ระยะเวลาการทำงานของคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรณีของตัวอย่างที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำสูงสุด ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตสามารถรักษาระยะเวลาการทำงานได้นานขึ้นก่อนที่จะเริ่มการก่อตัว นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณสารลดน้ำยังมีส่วนช่วยชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างซีเมนต์และน้ำ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตขยายออกไปมากขึ้น

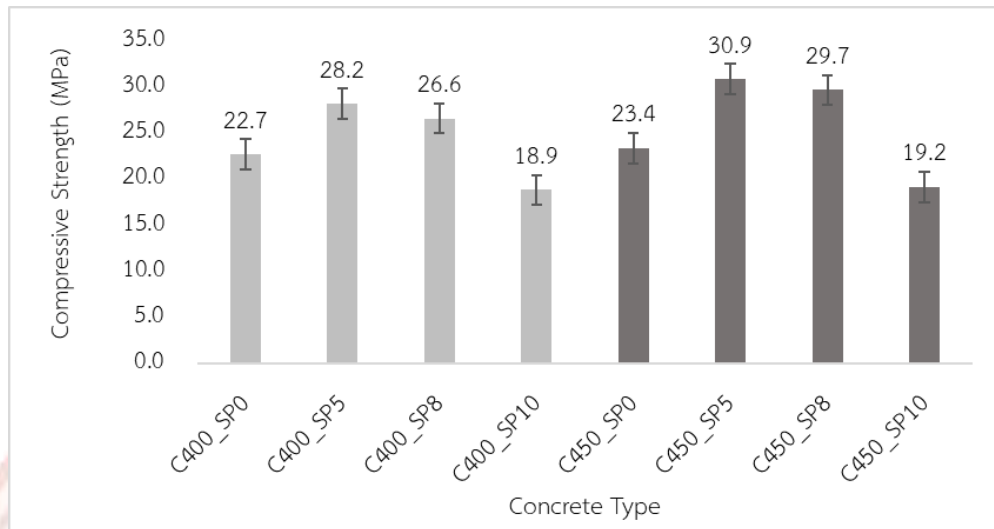


ภาพที่ 4-6 ค่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดของคอนกรีต

4.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

4.1.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

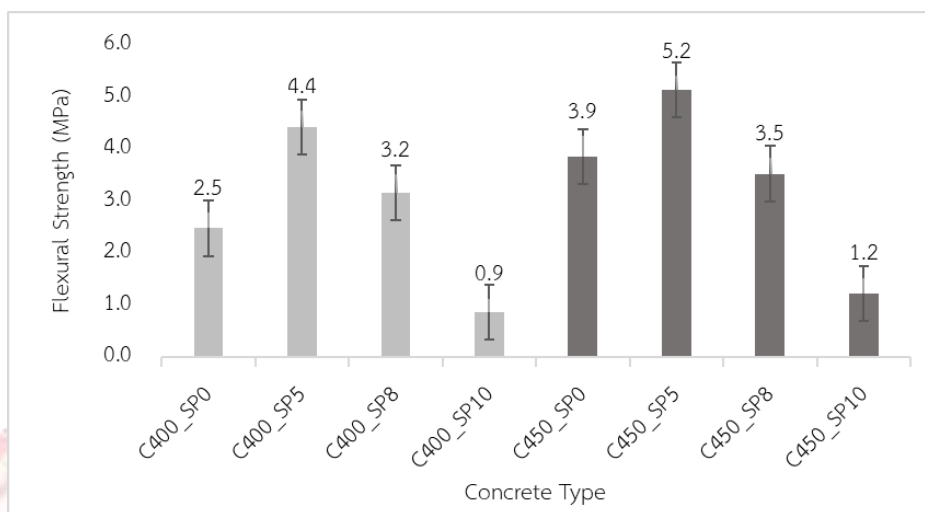
จากภาพที่ 4-7 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเองจากปริมาณซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแปรผันสารลดน้ำปริมาณสูง type G ที่ 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ผลการทดสอบพบว่า ปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึง 5% โดยเพิ่มขึ้น 24.2% เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีสารลดน้ำ จากนั้นเมื่อปริมาณสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8% ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง 5.67% เนื่องจากการใส่สารลดน้ำปริมาณสูงมากในปริมาณที่มากเกินไป ส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึง 5% โดยเพิ่มขึ้น 32% เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีสารลดน้ำ จากนั้นเมื่อปริมาณสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8% ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง 3.8% ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการแยกตัวเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้เนื้อของคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น โดยสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 5% มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 30.9 เมกะปาสคาล ขณะที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 10% มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำสุดที่ 18.9 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4-7 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.1.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัด (Flexural Strength)

จากภาพที่ 4-8 ผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเอง จากปริมาณซีเมนต์ 400 และ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแปรผันสารลดน้ำปริมาณสูง type G ที่ 0%, 5%, 8% และ 10% โดยน้ำหนักวัสดุเชื่อมประสาน ผลการทดสอบพบว่า สำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึง 5% โดยเพิ่มขึ้น 76% เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีสารลดน้ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8% ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง 54.6% ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการใช้สารลดน้ำในปริมาณที่มากเกินไป ส่วนสำหรับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารลดน้ำที่เพิ่มขึ้นจนถึง 5% โดยเพิ่มขึ้น 33.3% เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่มีสารลดน้ำ จากนั้น เมื่อปริมาณสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8% ค่ากำลังรับแรงดัดมีแนวโน้มลดลง 27.3% ซึ่งเกิดจากการใส่สารลดน้ำปริมาณสูงในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้เกิดการแยกตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นและส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตมากขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ค่ากำลังรับแรงดัดลดลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มค่ากำลังรับแรงดัด เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคมวลรวมแน่นหนาขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานแรงดัดได้ดีขึ้นโดยสัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 5% มีค่ากำลังรับแรงดัดสูงสุด เท่ากับ 5.2 เมกะปาสคาล ขณะที่สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 10% มีค่ากำลังรับแรงดัดต่ำสุด เท่ากับ 0.9 เมกะปาสคาล



ภาพที่ 4-8 ค่ากำลังรับแรงดัดที่อายุการบ่ม 28 วัน

4.1.4 ผลการคัดเลือกส่วนผสมสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน

ผลการทดสอบที่ใช้ในการคัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมประกอบด้วย การทดสอบความสามารถเติมเต็มช่องว่างภายใต้น้ำหนักด้วยตัวเอง ความสามารถไหลผ่านสิ่งกีดขวางได้ และความต้านทานการแยกตัว ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 รวมถึงมีกำลังอัดสูงกว่า 18 เมกะปาสคาล โดยอ้างอิงเกณฑ์การทดสอบจากตารางที่ 3-3 ส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ทั้งหมดถือเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการเทคอนกรีตด้วยโดรนต่อไป โดยผลการคัดเลือกแสดงดังตารางที่ 4-1 พบว่าคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเองที่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือกและเหมาะสมต่อการเทคอนกรีตด้วยโดรน คือส่วนผสมปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 8% ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถไหลเข้าแบบง่ายภายใต้ น้ำหนักตัวเอง สามารถไหลผ่านช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมโดยปราศจากการแยกตัวและยังคงมีความเป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างขนส่ง โดยมีค่าการทดสอบการไหลแผ่ 653 มิลลิเมตร และเวลาของการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร เท่ากับ 5 วินาที ส่วนการทดสอบการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง (L-Box) เท่ากับ 0.9 และการทดสอบความต้านทานการแยกตัว (GTM Screen Stability) เท่ากับ 5.7% ซึ่งการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นไปตามเกณฑ์ตามมาตรฐาน EFNARC 2002 และมีกำลังรับแรงอัดที่ 26.6 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแข็งแรงเพียงพอที่สามารถรับน้ำหนักได้ต่อโครงสร้างทั่วไป นอกจากนี้ตัวอย่าง C400_SP8 มีค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตเท่ากับ 1,829 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อยู่ในช่วงประมาณ 300-1,850 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งถือว่าเป็นคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 4-1 การคัดเลือกสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเอง

Tests Mix	GTM Screen Stability	L-Box Test	Slump Flow	Slump Flow at T _{50cm}	Compressiv e strength
C400_SP0	-	-	X	-	X
C400_SP5	X	X	X	X	/
C400_SP8	/	/	/	/	/
C400_SP10	/	/	/	/	/
C450_SP0	-	-	X	-	X
C450_SP5	/	/	/	/	/
C450_SP8	X	X	/	/	/
C450_SP10	X	X	/	/	/

4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดตัวแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบินของโดรน

4.2.1.1 ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกต่อพลังงานบินโดรนในสภาวะมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก

จากการทดสอบการบินของโดรนที่ระดับความสูง 5 เมตร โดยให้โดรนเคลื่อนที่ในแนวราบไปข้างหน้าเป็นระยะทาง 10 เมตร และบินกลับมายังจุดเริ่มต้น ทั้งในกรณีที่ไม่มีการบินแบกน้ำหนักบรรทุก และกรณีที่มีการแบกน้ำหนักบรรทุก 8 กิโลกรัม หลังจากนั้นได้ทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่แสดงบนอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์-ชั่วโมง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรนภายใต้เงื่อนไขทั้งสอง แสดงดังตารางที่ 4-2 โดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ใช้

ในการบิน ระยะเวลาการบิน ความเร็ว และอัตราการใช้พลังงานของโดรน ซึ่งสรุปผลการทดลองดังนี้

- พลังงานไฟฟ้า: การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทำให้การใช้พลังงานต่อหน่วยระยะทางเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของโดรน โดยเมื่อไม่มีน้ำหนักบรรทุก โดรนใช้พลังงานเฉลี่ยที่ 33.2 วัตต์-ชั่วโมง ขณะที่การบรรทุกน้ำหนัก 8 กิโลกรัมทำให้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้เพิ่มขึ้นเป็น 59.3 วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการบรรทุกน้ำหนัก 8 กิโลกรัมทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 78.6% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก

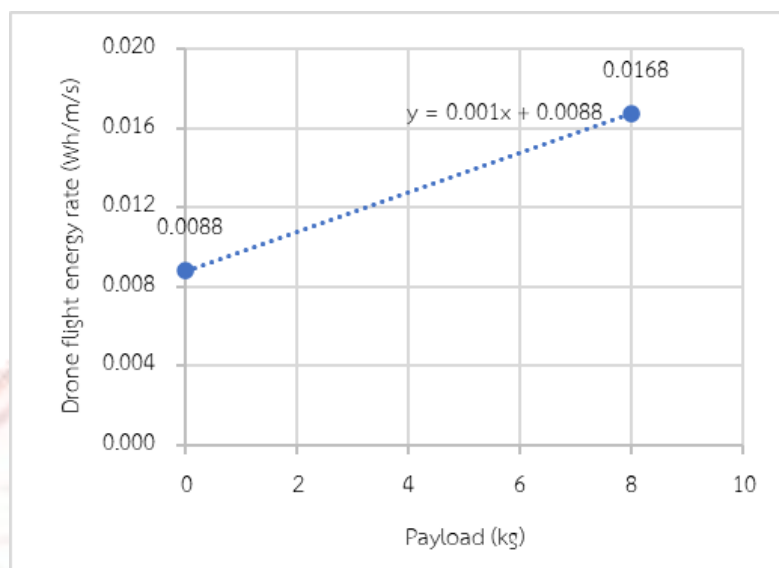
- ระยะเวลาการบิน: เมื่อโดรนแบกบรรทุกน้ำหนัก 8 กิโลกรัม ระยะเวลาการบินลดลงจาก 94 วินาที เหลือ 88 วินาที หรือเร็วกว่าการบินเดิมประมาณ 6.38% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุกไม่มีผลกระทบต่อระยะเวลาการบินของโดรน ตรงกันข้ามที่น้ำหนักบรรทุกยังอยู่ภายใต้ขีดจำกัดการยกของโดรน ดังนั้นปัจจัยสำคัญจึงขึ้นอยู่กับทักษะการควบคุมโดรนของนักบินเป็นหลัก
- ความเร็วในการบิน: ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเร็วในการบินพบว่า การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทำให้ความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการควบคุมการบินเพื่อรักษาเสถียรภาพขณะบรรทุกน้ำหนัก โดยในกรณีที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก โดรนมีความเร็วเฉลี่ยที่ 0.425 เมตรต่อวินาที ขณะที่เมื่อบรรทุกน้ำหนัก 8 กิโลกรัม ความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.459 เมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นว่าแม้ว่ามีการบรรทุกน้ำหนัก โดรนยังสามารถรักษาความเร็วได้ใกล้เคียงกับการบินที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกภายใต้ขีดจำกัดการยกของโดรน ทั้งนี้ปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมความเร็วดังกล่าวขึ้นอยู่กับทักษะและความชำนาญในการควบคุมของนักบินเป็นหลัก
- อัตราการใช้พลังงานบินต่อเมตร-วินาที: การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยเมตรและเวลาสูงขึ้น โดยเมื่อไม่มีน้ำหนักบรรทุก โดรนใช้พลังงานเฉลี่ยที่ 0.0088 วัตต์ชั่วโมงต่อเมตร-วินาที แต่เมื่อบรรทุกน้ำหนัก 8 กิโลกรัม อัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 0.0168 วัตต์ชั่วโมงต่อเมตร-วินาที ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 1.91 เท่า

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การบรรทุกน้ำหนักมีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพการบินของโดรน โดยการเพิ่มน้ำหนักทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยสูงขึ้น แม้ว่าโดรนที่มีน้ำหนักบรรทุกยังสามารถรักษาความเร็วได้ใกล้เคียงกับการบินที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกก็ตาม นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4-2 สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก แสดงดังภาพที่ 4-9 อัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลาบินโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก แสดงดังภาพที่ 4-10 และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วบินโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก แสดงดังภาพที่ 4-11

ตารางที่ 4-2 พลังงานไฟฟ้าของการบินโดรนโดยมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก

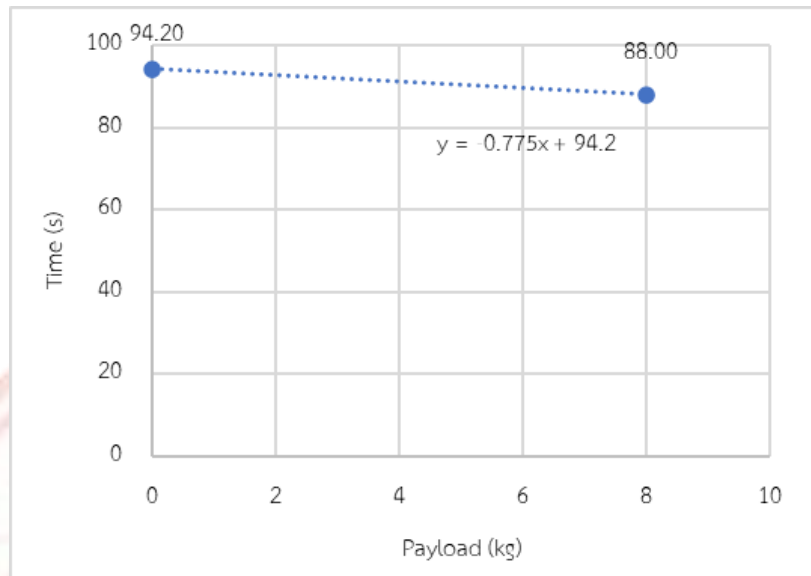
Trial	Drone without payload				Drone with 8 kg payload			
	Flight Energy (Wh)	Flight Time (s)	Flight Velocity (m/s)	Energy Rate (Wh/m/s)	Flight Energy (Wh)	Flight Time (s)	Flight Velocity (m/s)	Energy Rate (Wh/m/s)
1	30.0	91	0.440	0.0082	61.20	88	0.455	0.0174
2	35.3	96	0.417	0.0092	47.30	77	0.519	0.0154
3	31.5	91	0.440	0.0087	50.20	81	0.494	0.0155
4	34.7	96	0.417	0.0090	71.10	101	0.396	0.0176
5	34.5	97	0.412	0.0089	66.80	93	0.430	0.0180
Total	166.0	471	-	-	296.6	440	-	-
Average	33.2	94	0.425	0.0088	59.3	88	0.459	0.0168

จากภาพที่ 4-9 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพลังงานไฟฟ้าของการบินโดรน และน้ำหนักบรรทุก โดยในกรณีที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0176 วัตต์ชั่วโมงต่อเมตร-วินาที เมื่อบรรทุกน้ำหนัก 8 กิโลกรัม พลังงานเฉลี่ยที่ใช้เพิ่มขึ้นเป็น 0.0168 วัตต์ ชั่วโมงต่อเมตรต่อวินาที จากข้อมูลนี้ สามารถสร้างสมการเชิงเส้นได้คือ $y = 0.001x + 0.0088$ โดยที่ y คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในหน่วยวัตต์ชั่วโมงต่อเมตรต่อวินาที และ x คือหน่วยน้ำหนักบรรทุกใน กิโลกรัม ค่าความชัน (slope) ของกราฟแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า สำหรับทุกการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก 1 กิโลกรัม พลังงาน ไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นประมาณ 0.001 วัตต์ชั่วโมงต่อเมตรต่อวินาที ในกรณีที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก (เมื่อ $x=0$) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อยู่ที่ 0.0088 วัตต์ชั่วโมงต่อเมตรต่อวินาที ความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราของพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก ซึ่งสามารถนำข้อมูลนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบกริดด้วยโดรนในสภาพการทำงานจริง เพื่อทราบอัตราการใช้พลังงาน ไฟฟ้าในแต่ละสถานการณ์



ภาพที่ 4-9 อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก

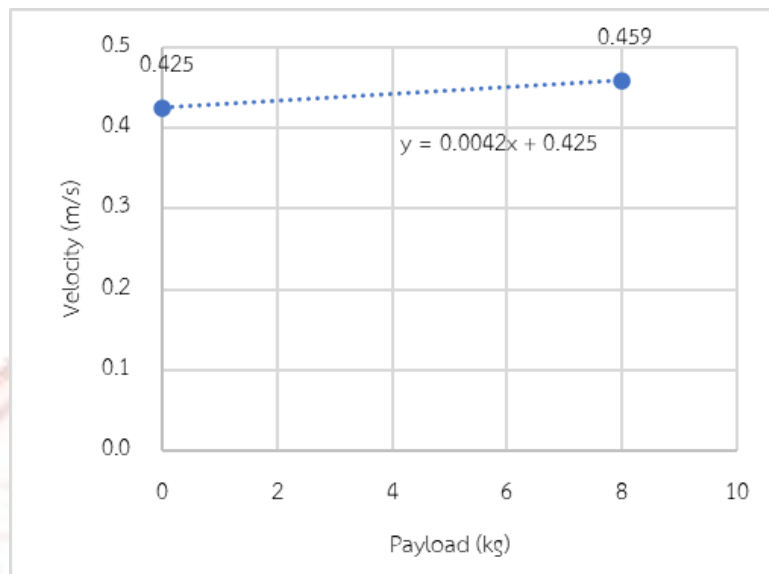
จากภาพที่ 4-10 แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อระยะเวลาการบินของโดรน ตรงกันข้ามที่น้ำหนักบรรทุกยังอยู่ภายใต้ขีดจำกัดการยกของโดรน ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบินของโดรนไม่ได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักบรรทุกเพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงทักษะและความชำนาญของนักบินที่ควบคุมโดรนเป็นหลัก นักบินที่มีความเชี่ยวชาญสามารถจัดการกับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดีขึ้น เช่น สภาพอากาศ ความแม่นยำในการควบคุม และการปรับตัวต่อสถานการณ์ที่ไม่คาดคิด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบินโดรน นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวนำไปใช้ในการคำนวณระยะเวลาการบินของโดรนในกรณีที่มีการบรรทุกน้ำหนักที่แตกต่างกันภายในขีดจำกัดการยกของโดรน เพื่อช่วยประเมินระยะเวลาการบินของโดรนสำหรับบรรทุกน้ำหนักในแต่ละครั้ง



ภาพที่ 4-10 อัตราการใช้เวลาบินของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก

จากภาพที่ 4-11 แสดงให้เห็นว่า แม้ว่ามีการบรรทุกน้ำหนัก โดรนยังคงสามารถรักษาความเร็วในการบินได้ในระดับที่ใกล้เคียงกับการบินในสถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขีดจำกัดการยกของโดรน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนและความสามารถในการรักษาสมดุลของอากาศยานขณะปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมความเร็วและเสถียรภาพในการบิน ได้แก่ ทักษะและความชำนาญของนักบินที่ทำหน้าที่บังคับโดรน รวมถึงการตั้งค่าระบบควบคุมการบินให้เหมาะสมกับสถานะการปฏิบัติงาน

ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการคำนวณและคาดการณ์อัตราเร็วในการบินของโดรนในกรณีที่มีการบรรทุกน้ำหนักที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานเทคนิคกริดโดยใช้โดรน โดยสามารถกำหนดแผนการบินที่มีประสิทธิภาพ เช่น การปรับเปลี่ยนความเร็วการบินให้เหมาะสมกับน้ำหนักบรรทุกในแต่ละเที่ยวบิน เพื่อลดผลกระทบต่อเสถียรภาพของโดรนและเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งวัสดุ นอกจากนี้ ข้อมูลดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้เพื่อพัฒนาแนวทางระบบควบคุมการบินของโดรนให้สามารถตอบสนองต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพที่ 4-11 อัตราการใช้ความเร็วบินของโดรนต่อหน่วยน้ำหนักบรรทุก

4.2.1.2 ผลกระทบของน้ำหนักบรรทุกต่อพลังงานบินโดรนในสถานะเทคอนกรีต

การทดสอบการบินของโดรนที่ระดับความสูง 5 เมตร โดยให้โดรนเคลื่อนที่ในแนวราบไปข้างหน้าเป็นระยะทาง 10 เมตร และบินกลับมายังจุดเริ่มต้น เพื่อทำการเทคอนกรีตที่มีน้ำหนักบรรทุก 4 กิโลกรัม โดยในการเทคอนกรีตนั้นใช้กรวยรองรับคอนกรีตที่ปล่อยออกมาจากถังบรรจุคอนกรีตของโดรน หลังจากเทคอนกรีตเสร็จได้มีการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่แสดงบนอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ชั่วโมง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของการเทคอนกรีตโดรน แสดงดังตารางที่ 4-3

จากตารางที่ 4-3 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งในการบินและเทคอนกรีต ความเร็วในการบินระยะเวลาในการทำงาน และอัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยของโดรนที่มีน้ำหนักบรรทุก 4 กิโลกรัม จากผลการทดสอบพบว่า เวลาเฉลี่ยในการเทอยู่ที่ 11.67 วินาที อัตราเร็วในการเทคอนกรีตด้วยโดรนเฉลี่ย 0.35 กิโลกรัมต่อวินาที และอัตราการใช้พลังงานเทคอนกรีตด้วยโดรนเฉลี่ย 0.132 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมต่อวินาที ทั้งนี้พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบินและเทคอนกรีตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะเวลาการทำงานและน้ำหนักบรรทุก โดยเมื่อระยะเวลาและปริมาณน้ำหนักเพิ่มขึ้น พลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นตามไปด้วยจากข้อมูลดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในส่วนของการเทคอนกรีตสำหรับบ้านชั้นเดียวในสภาพการทำงานจริงได้

ตารางที่ 4-3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งในการบินและเทคอนกรีตของน้ำหนักบรรทุก 4 กิโลกรัม

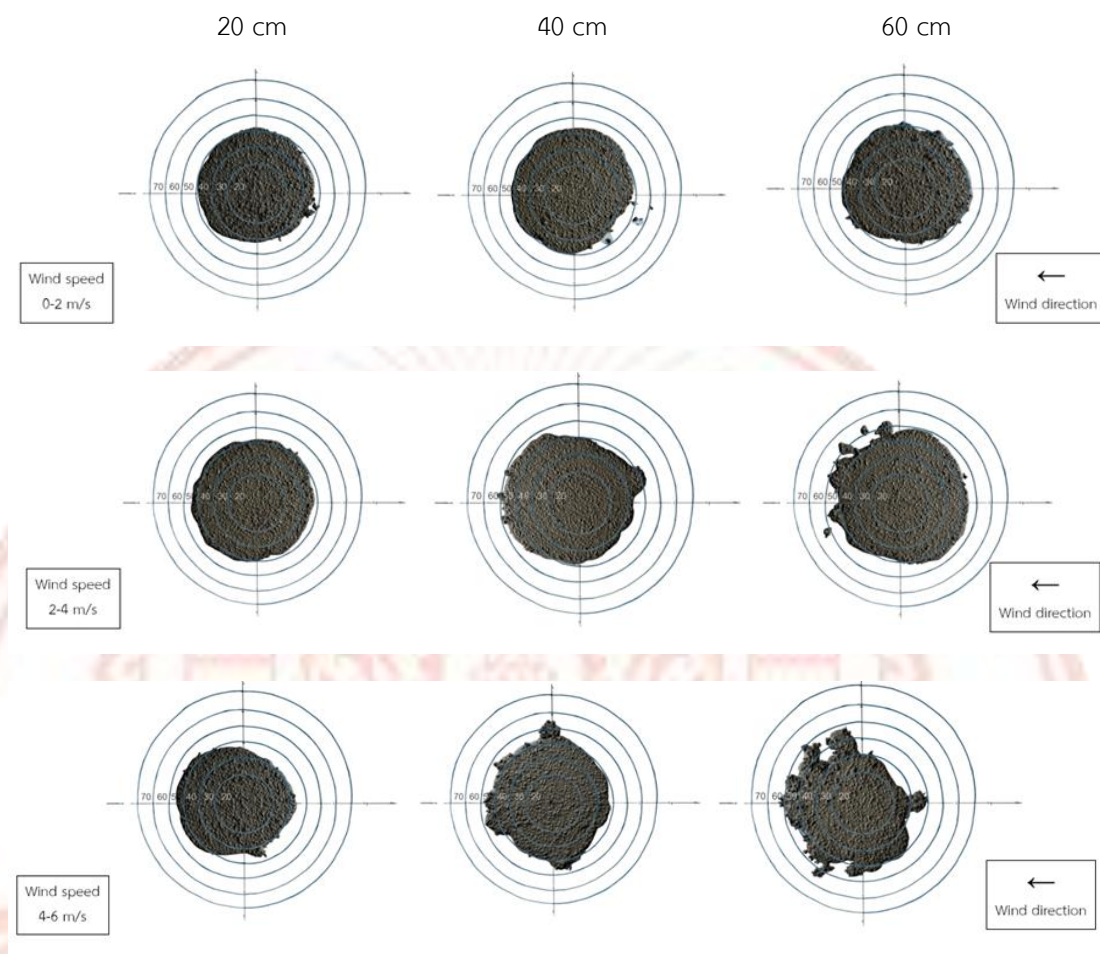
Trial	Drone concrete pouring with a payload of 4 kg					
	Flight Energy (Wh)	Flight Time (s)	Pouring Time (s)	Pouring rate (kg/s)	Flight Energy Rate (Wh/m/s)	Pouring Energy Rate (Wh/kg/s)
1	30.2	58	14	0.29	0.0130	0.130
2	32.1	62	10	0.40	0.0129	0.129
3	31.3	60	12	0.33	0.0130	0.130
4	32.3	61	10	0.40	0.0132	0.132
5	35.6	64	14	0.29	0.0139	0.139
6	30.7	58	10	0.40	0.0132	0.132
Total	192.2	363	70	-	-	-
Average	32.0	61	11.67	0.35	0.0132	0.132

4.2.2 ผลกระทบของแรงลมในขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการและสนามจริง

การศึกษาผลกระทบของแรงลมขณะเทคอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการใช้โดรนสำหรับเทคอนกรีต เนื่องจากแรงลมทำให้คอนกรีตที่ถูกปล่อยออกจากโดรนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอหรือถูกพัดออกจากพื้นที่ที่ต้องการเท ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและความสม่ำเสมอของคอนกรีต ด้วยเหตุนี้จึงมีการทดสอบผลกระทบของแรงลมต่อการเทคอนกรีตด้วยโดรนทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามจริง เพื่อพัฒนาแนวทางในการปรับปรุงการเทคอนกรีตด้วยโดรนให้มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงสุด

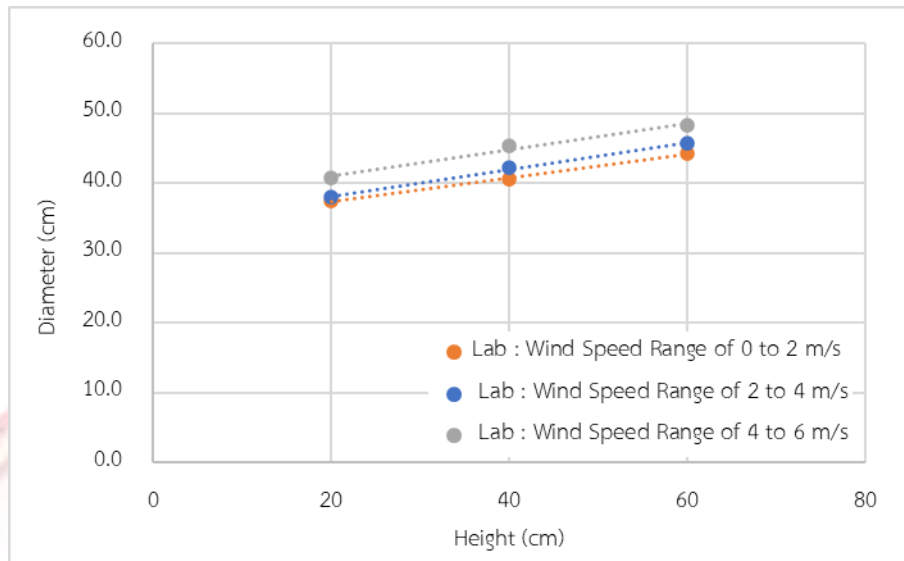
4.2.2.1 ผลกระทบของแรงลมขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาผลกระทบของแรงลมขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมที่สามารถควบคุมได้ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของแรงลมต่อการเทคอนกรีต โดยการจำลองสภาวะลมทำได้ผ่านการใช้พัดลมขนาดใหญ่ที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วลม เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วลมในสภาวะต่างๆ จากนั้นจึงทำการเทคอนกรีตโดยการปล่อยอิสระลงบนแผ่นที่มีรัศมีวงกลม ดังแสดงในภาพที่ 4-12



ภาพที่ 4-12 การกระจายตัวของคอนกรีตขณะเทในห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 4-13 พบว่าเมื่อความสูงในการเทคอนกรีตเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกช่วงความเร็วลม นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของการแผ่กระจายของคอนกรีตเมื่อความเร็วลมแตกต่างกัน สังเกตได้ว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น การแผ่กระจายของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของการแผ่กระจายของคอนกรีตกับความสูงขณะเทคอนกรีต แสดงดังตารางที่ 4-4



ภาพที่ 4-13 เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

จากตารางที่ 4-4 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความสูงในการเทคอนกรีตทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในทุกช่วงความเร็วลม แสดงให้เห็นว่าทั้งความสูงในการเทคอนกรีตและความเร็วลมมีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจาย โดยสมการเชิงเส้นที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงในการเทคอนกรีต (x) และเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจาย (y) ในแต่ละช่วงความเร็วลมแสดงให้เห็นว่าค่าความชันของสมการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าความสูงในการเทคอนกรีตในสภาพความเร็วลมที่สูงขึ้นส่งผลต่อการแผ่กระจายของคอนกรีตมากขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลกระทบของความสูงและความเร็วลม มีดังนี้

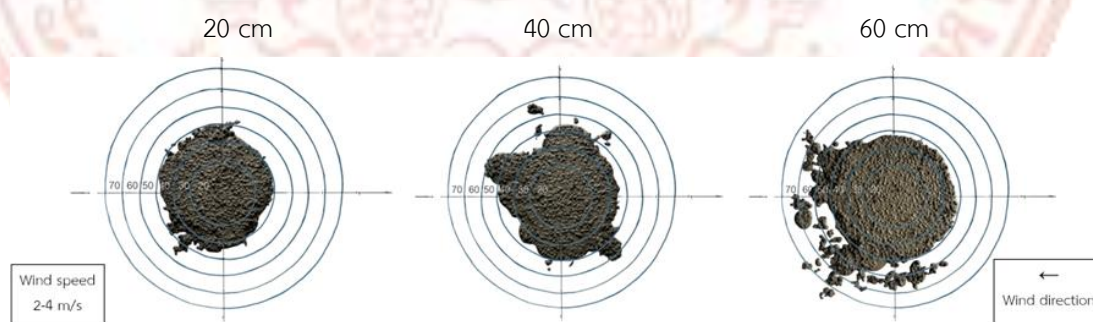
- 1) ความสูงในการเทคอนกรีต: เมื่อคอนกรีตถูกปล่อยจากที่สูง มวลของคอนกรีตได้รับแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงและแรงต้านจากอากาศในระหว่างที่ตกลงมา ความสูงที่เพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีเวลามากขึ้นในการกระจายตัวก่อนถึงพื้น ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายเพิ่มขึ้น
- 2) ความเร็วลม: ในสภาพที่มีลมแรงทำให้แรงลมส่งผลกระทบต่อคอนกรีตในทิศทางแนวราบ ขณะที่คอนกรีตตกลงสู่พื้น โดยแรงลมดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการกระจายตัวของคอนกรีต ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของการแผ่กระจายตัวคอนกรีตเพิ่มขึ้นกว่าสภาพไม่มีลม

ตารางที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของการแผ่กระจายคอนกรีตกับความสูงขณะเท

Wind Speed Range (m/s)	X = Height (cm)	Y= Diameter of Concrete Spread (cm)	Diameter of Concrete Spread Equation
0-2	20	37.4	$y = 0.1719x + 33.833$
	40	40.5	
	60	44.3	
2-4	20	38	$y = 0.1938x + 34.208$
	40	42.1	
	60	45.8	
4-6	20	40.8	$y = 0.1875x + 37.25$
	40	45.3	
	60	48.3	

4.2.2.2 ผลกระทบของแรงลมขณะเทคอนกรีตในสนามจริง

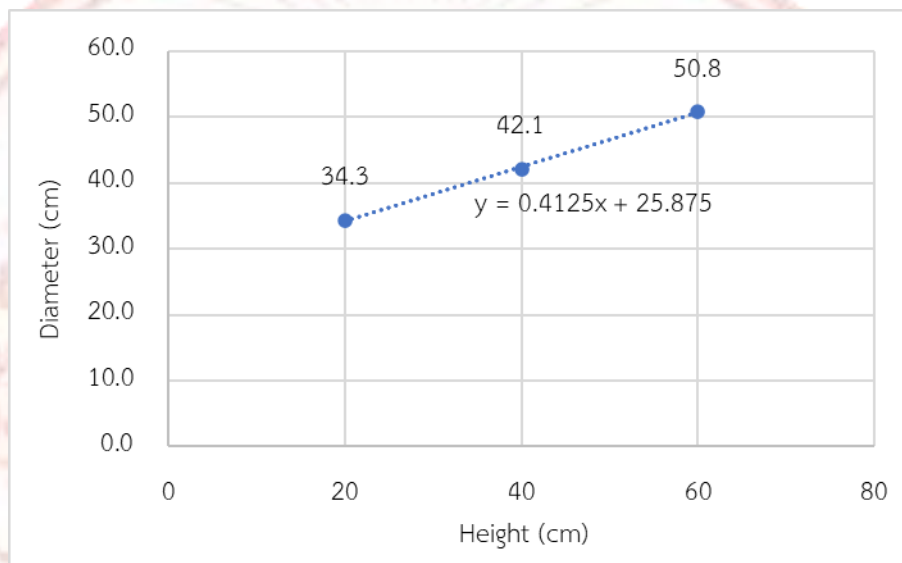
การศึกษาผลกระทบของแรงลมขณะเทคอนกรีตในสนามจริง เป็นการทดลองเทคอนกรีตในสภาพแวดล้อมจริงที่มีแรงลม เพื่อสังเกตผลกระทบต่อการแผ่กระจายและคุณภาพของคอนกรีต โดยวิธีการทดสอบทำการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบการปล่อยอิสระลงบนแผ่นรัศมีวงกลม จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการกระจายตัวของคอนกรีตในแต่ละทิศทางรวม 4 ค่า โดยวัดทำมุม 0° , 90° และ 45° แสดงดังภาพที่ 4-14



ภาพที่ 4-14 การกระจายตัวของคอนกรีตขณะเทในสนามจริง

จากภาพที่ 4-15 พบว่าความเร็วลมเฉลี่ย 2.5 เมตรต่อวินาที กับความสูงในขณะเทคอนกรีต 20, 40 และ 60 เซนติเมตร มีรัศมีเฉลี่ยการแผ่กระจายของการเทคอนกรีตด้วยโดรน 34.3, 42.1 และ 50.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามความสูงในการเท โดยเฉพาะที่ความสูง 60 เซนติเมตร คอนกรีตมีการแผ่กระจายมากที่สุด ในขณะที่มี

ความสูง 20 เซนติเมตร รัศมีการแผ่กระจายของคอนกรีตน้อยที่สุด นอกจากนี้ความเร็วลมยังส่งผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีต โดยพบว่าเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กราฟที่แสดงในภาพนี้บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงในการเทคอนกรีตกับเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีต โดยสมการเชิงเส้น $y = 0.4125x + 25.875$ แสดงให้เห็นว่าทุกครั้งที่ความสูงในการเทคอนกรีตด้วยโดรนเพิ่มขึ้น 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายของคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณ 0.41 เซนติเมตร

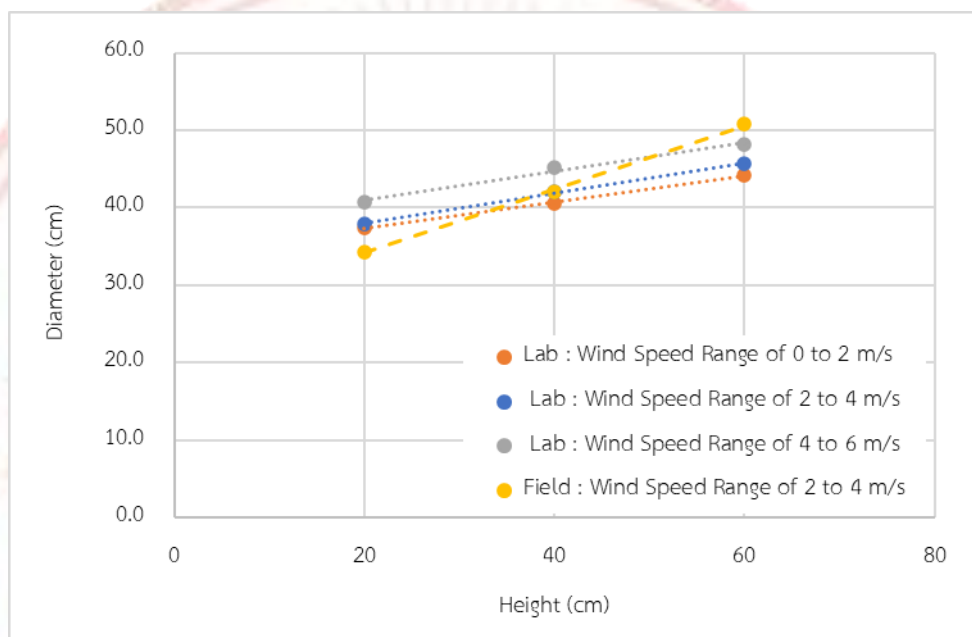


ภาพที่ 4-15 เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตในสนามจริง

4.2.2.3 การเปรียบเทียบผลกระทบแรงลมขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการกับสนามจริง การเปรียบเทียบผลกระทบของแรงลมในการเทคอนกรีตด้วยโดรนระหว่างการทดลองในห้องปฏิบัติการและในสนามจริง โดยพิจารณาค่าการกระจายของคอนกรีตในระดับความสูง 20, 40 และ 60 เซนติเมตร ภายใต้ความเร็วลมช่วงที่แตกต่างกัน 0 ถึง 6 เมตรต่อวินาที ในห้องปฏิบัติการ และ 2 ถึง 4 เมตรต่อวินาที ในสนามจริง

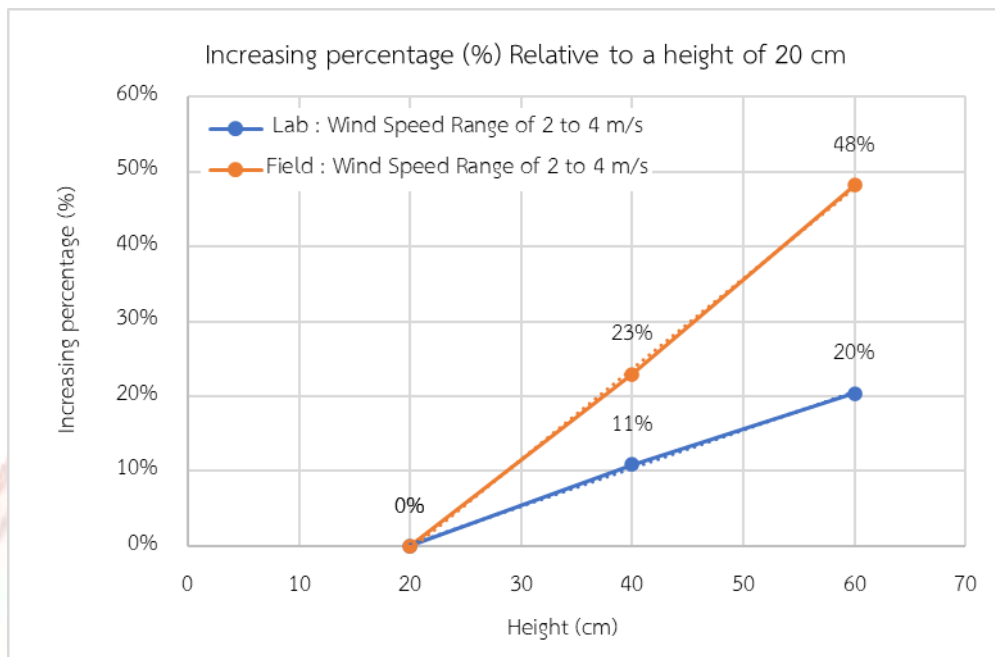
จากภาพที่ 4-16 แสดงให้เห็นว่าการเทคอนกรีตจากความสูง 20, 40 และ 60 เซนติเมตร ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของคอนกรีตแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมจริงที่ไม่สามารถควบคุมสภาพอากาศได้เหมือนในห้องปฏิบัติการ การเพิ่มความสูงของการเทคอนกรีตทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งการกระจายในสนามจริงมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นความสูงของการเทคอนกรีตมีผลต่อการกระจายตัวและปัจจัยภายนอก

เช่น ความเร็วลมในสนามจริง ทำให้ผลการกระจายตัวแตกต่างจากในห้องปฏิบัติการ แนวทางการแก้ไขใช้เครื่องมือช่วย เช่น ท่อส่งคอนกรีต หรือกรวยรองรับคอนกรีต เพื่อควบคุมทิศทางและลดความสูงของการเทคอนกรีต นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตเมื่อเทียบกับระดับความสูง 20 เซนติเมตร ทั้งในสนามจริงและห้องปฏิบัติการ เพื่อทราบถึงเปอร์เซ็นต์การแผ่กระจายของคอนกรีต แสดงดังภาพที่ 4-17



ภาพที่ 4-16 เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตระหว่างในห้องปฏิบัติการและสนามจริง

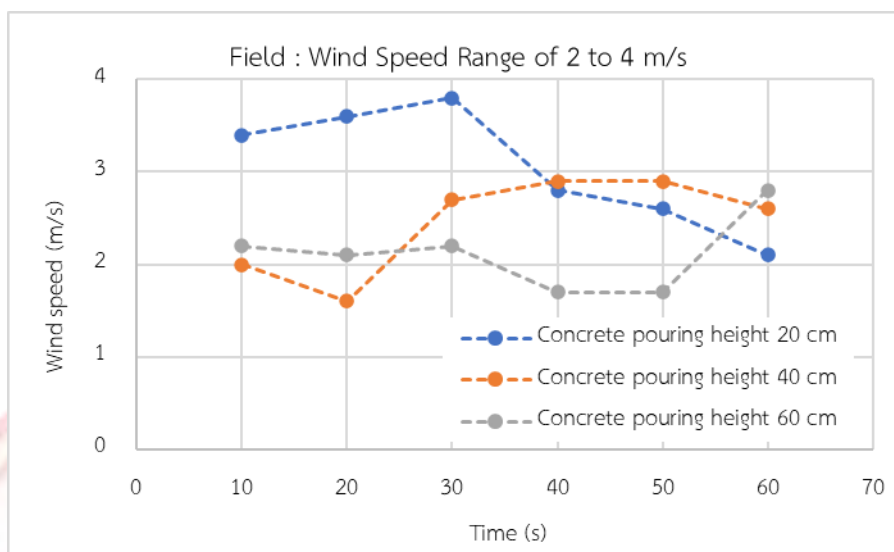
จากภาพที่ 4-17 แสดงให้เห็นถึงผลของการเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการและในสนามจริง โดยมีการเปรียบเทียบการกระจายตัวของคอนกรีตที่ความสูงต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความสูง 20 เซนติเมตร ในห้องปฏิบัติการพบว่า ความเร็วลมระหว่าง 2-4 เมตรต่อวินาที เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของการเทคอนกรีต โดยที่ระดับความสูง 40 เซนติเมตร การกระจายตัวเพิ่มขึ้น 11% และที่ระดับความสูง 60 เซนติเมตร การกระจายตัวเพิ่มขึ้น 20% เมื่อเทียบกับการเทที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความสูงทำให้การกระจายตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในอัตราที่สม่ำเสมอ ในส่วนของสนามจริงพบว่า ความเร็วลมเฉลี่ย 2.5 เมตรต่อวินาที เส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นมากกว่าในห้องปฏิบัติการอย่างชัดเจน โดยที่ระดับความสูง 40 เซนติเมตร การกระจายตัวเพิ่มขึ้น 23% และที่ระดับความสูง 60 เซนติเมตร การกระจายตัวเพิ่มขึ้น 48% เมื่อเทียบกับระดับความสูง 20 เซนติเมตร แสดงถึงผลกระทบของแรงลมในสนามจริงที่ทำให้รัศมีการกระจายตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น



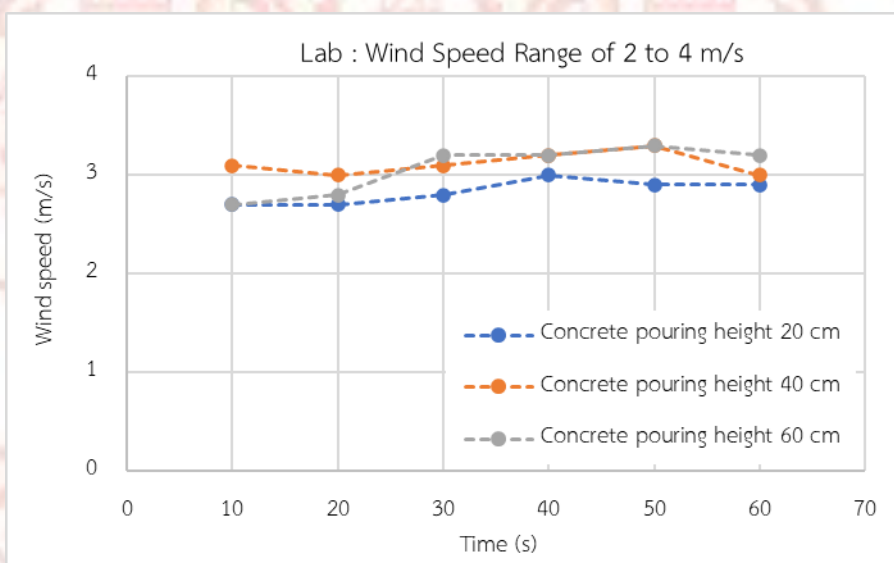
ภาพที่ 4-17 เปอร์เซ็นต์การแผ่กระจายคอนกรีตเมื่อเทียบกับระดับความสูง 20 เซนติเมตร

จากเปอร์เซ็นต์การแผ่กระจายของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการและสนามจริงเทียบกับระดับความสูง 20 เซนติเมตร จึงสรุปได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางการกระจายตัวของคอนกรีตด้วยโดรนในสนามจริงมีแนวโน้มที่ได้รับผลกระทบจากแรงลมมากกว่าในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่ากับในห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้มีความผันผวนและความไม่แน่นอนในการกระจายตัวของคอนกรีตมากขึ้น โดยความเร็วลมในห้องปฏิบัติการและสนามจริง แสดงดังภาพที่ 4-18 และ 4-19

จากภาพที่ 4-18 และ 4-19 พบว่า ความเร็วลมในสนามจริงมีการเปลี่ยนแปลงในช่วง 1.5 - 4 เมตรต่อวินาที ซึ่งแสดงถึงความผันผวนของแรงลมในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ส่งผลให้การบินของโดรนขาดความเสถียร ขณะที่ในห้องปฏิบัติการ ความเร็วลมอยู่ในช่วง 2.5 - 3.5 เมตรต่อวินาที ทำให้การเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมในสนามจริงมีค่ามากกว่าห้องปฏิบัติการ สะท้อนถึงอิทธิพลของแรงลมตามธรรมชาติที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของการบินโดรนในสภาวะภาคสนาม



ภาพที่ 4-18 ความเร็วลมขณะเทคอนกรีตในสนามจริง



ภาพที่ 4-19 ความเร็วลมขณะเทคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

4.2.3 ผลการศึกษาการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเทคอนกรีตด้วยโดรนกับตัวแปรการเทคอนกรีตในสภาพการทำงานจริง ได้แก่ การเทคอนกรีตแบบการปล่อยอิสระ และการเทคอนกรีตแบบมีจุดรองรับ หลังจากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของการเทคอนกรีตด้วยโดรน เพื่อเปรียบเทียบกับ การเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ

4.2.3.1 ผลการศึกษาการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยการปล่อยอิสระ

การทดสอบการเทคอนกรีตด้วยโดรน โดยทำการเทคอนกรีตแบบการปล่อยอิสระลงบนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร คานขนาด $100 \times 100 \times 350$ มิลลิเมตร และคานซ่อมแซมขนาด $150 \times 75 \times 200$ มิลลิเมตร พบว่าการเทคอนกรีตด้วยโดรนไม่ลงในแบบหล่ออย่างที่ต้องการ ทำให้คอนกรีตกระจายตัวออกนอกแบบหล่อค่อนข้างมาก แสดงดังภาพที่ 4-20 ส่งผลให้เกิดการสูญเสียวัสดุและเพิ่มจำนวนรอบในการเทคอนกรีตมากขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่

- 1) การควบคุมโดรน: การใช้โหมด GPS ทำให้โดรนบินเกิดข้อผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) เนื่องจากสัญญาณ GPS ขาดความเสถียร โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ GPS ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางหรือสัญญาณรบกวน การแก้ไขคือการใช้โหมดควบคุม Altitude ซึ่งเป็นการล็อกเฉพาะระดับความสูง ไม่ล็อกแกนการบิน x และแกน y ของโดรน วิธีนี้ทำให้เกิดข้อผิดพลาดแบบระบบ (Systematic Error) ทำให้โดรนลอยตัวได้นิ่งมากขึ้น แต่ความแม่นยำขึ้นอยู่กับความชำนาญของนักบิน
- 2) สภาพอากาศ: การปล่อยคอนกรีตในสภาพอากาศที่มีแรงลมสูงทำให้การบินโดรนไม่เสถียรและส่งผลต่อความแม่นยำในการเทคอนกรีต การแก้ไขโดยการเสริมจตุรกรับบนแบบหล่อช่วยเพิ่มพื้นที่ในการเทคอนกรีต ลดความเสี่ยงจากการสูญเสียวัสดุที่ถูกต้องนอกพื้นที่
- 3) ขนาดและรูปร่างของแบบหล่อ: การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อที่มีขนาดเล็กทำได้ยาก เนื่องจากการควบคุมโดรนให้แม่นยำในพื้นที่จำกัด แต่การเทคอนกรีตลงในพื้นที่ที่กว้างขึ้นทำให้กระบวนการเทคอนกรีตด้วยโดรนง่ายขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ในการกระจายตัวของคอนกรีตและช่วยลดการสูญเสียวัสดุ ทำให้การเทคอนกรีตสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพที่ 4-20 การเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยการปล่อยอิสระ (a) ขณะเทคอนกรีต
(b) หลังเทคอนกรีตเสร็จ

4.2.3.2 ผลการศึกษาการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยมีจุดรองรับ

หลังจากทำการเทคอนกรีตด้วยโดรนโดยการปล่อยอิสระ พบว่ามีการสูญเสียวัสดุค่อนข้างมาก เนื่องจากคอนกรีตไม่ตกลงในแบบหล่ออย่างแม่นยำ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ ได้สร้างกรวยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 450 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่างขนาด 100 มิลลิเมตร เพื่อช่วยรองรับการเทและลำเลียงคอนกรีตจากโดรนไปยังแบบหล่อ ดังนั้นขั้นตอนถัดไปคือการเทคอนกรีตด้วยโดรนมีจุดรองรับ โดยทำการเทคอนกรีตลงบนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด $150 \times 150 \times 150$ มิลลิเมตร คานขนาด $100 \times 100 \times 350$ มิลลิเมตร และคานซ่อมแซมขนาด $150 \times 75 \times 200$ มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าการใช้กรวยรองรับการเทและลำเลียงคอนกรีตลงแบบหล่อได้อย่างแม่นยำ ลดการกระจายตัวและการสูญเสียวัสดุ นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบปล่อยอิสระและการใช้จุดรองรับ แสดงไว้ในตารางที่ 4-5

จากข้อมูลในตารางที่ 4-6 พบว่าการเทคอนกรีตแบบปล่อยอิสระมีจำนวนรอบการเทมากกว่าการเทที่มีจุดรองรับ ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตที่ได้มีค่ากำลังรับแรงต่ำกว่าการเทแบบมีจุดรองรับ เนื่องจากการเทจากความสูงของโดรนโดยไม่มีจุดรองรับ ทำให้คอนกรีตกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของวัสดุและลดความหนาแน่นของเนื้อคอนกรีตในบางจุด นอกจากนี้ การสูญเสียวัสดุส่วนที่เป็นปูนซีเมนต์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการยึดเกาะและเชื่อมประสานระหว่างวัสดุ หากปูนซีเมนต์กระเด็นออกจากแบบหล่อ ทำให้คอนกรีตขาดความสมดุลของส่วนผสม ส่งผลให้กำลังรับแรงของคอนกรีตลดลง

ตารางที่ 4-5 ปัจจัยเทคอนกรีตด้วยโดรนระหว่างการปล่อยอิสระและแบบมีจตุรองรับ

ปัจจัย	การปล่อยแบบอิสระ	การปล่อยแบบมีจตุรองรับ
ความแม่นยำในการเทคอนกรีต	ความแม่นยำในการเทคอนกรีตอยู่ในระดับต่ำกว่า เนื่องจากขนาดและรูปร่างของแบบหล่อมีขนาดเล็ก ทำให้ต้องเพิ่มจำนวนรอบในการเทคอนกรีต	ความแม่นยำในการเทคอนกรีตสูงขึ้น เนื่องจากจตุรองรับช่วยลำเลียงคอนกรีตลงแบบหล่อตามที่ต้องการ โดยสามารถควบคุมปริมาณการเทคอนกรีตด้วยโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้จำนวนรอบในการเทคอนกรีตเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดไว้
การสูญเสียวัสดุ	การสูญเสียวัสดุสูง เนื่องจากคอนกรีตถูกพัดออกนอกพื้นที่	การสูญเสียวัสดุลดลง เนื่องจากจตุรองรับช่วยให้การเทคอนกรีตลงในแบบหล่ออย่างแม่นยำ
ผลกระทบของสภาพแวดล้อม	แรงลม มีผลกระทบสูงต่อประสิทธิภาพในการเทคอนกรีต	แรงลม มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเทคอนกรีตต่ำกว่าการเทคอนกรีตแบบอิสระ
เวลาในการเทคอนกรีต	ใช้เวลานานกว่า เนื่องจากการควบคุมโดรนให้ตรงกับแบบหล่อที่มีขนาดเล็ก เป็นไปได้ยาก ทำให้โดรนใช้เวลาในการบินนานขึ้น	ใช้เวลาน้อยลง เนื่องจากจตุรองรับช่วยให้การทำงานเร็วขึ้น ซึ่งส่งผลให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรน

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบจำนวนรอบการเทและค่ากำลังรับแรงระหว่างปล่อยอิสระและมีจตุรองรับ

แบบหล่อ	รูปแบบเทคอนกรีต	จำนวนรอบการเทในแต่ละครั้ง			เฉลี่ยจำนวนรอบเทในแต่ละครั้ง	ค่ากำลังรับแรง MPa
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
ลูกบาศก์ 150x150x150 mm	ปล่อยอิสระ	4	4	3	4	19.2
	มีจตุรองรับ	2	2	3	2	24.1
คาน 100x100x350 mm	ปล่อยอิสระ	3	3	3	3	1.8
	มีจตุรองรับ	3	2	2	2	2.7
คานซ่อมแซม 150x75x200 mm	ปล่อยอิสระ	4	3	3	3	10.8
	มีจตุรองรับ	2	2	3	2	12.2

จากข้อมูลในตารางที่ 4-7 พบว่าการเทคอนกรีตด้วยวิธีการปล่อยอิสระมีอัตราการสูญเสียคอนกรีต พลังงาน และเวลามากกว่าการเทคอนกรีตแบบมีจตุรองรับ เนื่องจากการเทคอนกรีตแบบมีจตุรองรับสามารถควบคุมปริมาณและตำแหน่งการเทได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้จำนวนรอบในการเทคอนกรีตสอดคล้องกับเป้าหมายที่กำหนด อีกทั้งยังลดเวลาในการดำเนินงาน ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรน ช่วยให้การทำงานรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นจึงนำจตุรรองรับคอนกรีตมาช่วยในการเทคอนกรีตด้วยโดรน โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 วิธีตามรูปแบบของแบบหล่อ

ตารางที่ 4-7 เปรียบเทียบอัตราการสูญเสียคอนกรีตระหว่างการปล่อยอิสระและแบบมีจตุรองรับ

แบบหล่อ	รูปแบบเทคอนกรีต	จำนวนรอบเทที่กำหนด	ปริมาตรเทที่กำหนด (m ³)	ปริมาตรเทได้จริง (m ³)	การสูญเสียคอนกรีต (m ³)	อัตราการสูญเสียคอนกรีต (%)
ลูกบาศก์ 150x150x150 mm	ปล่อยอิสระ	2	0.0034	0.0062	0.0028	83
	มีจตุรองรับ	2	0.0034	0.0040	0.0006	17
คาน 100x100x350 mm	ปล่อยอิสระ	2	0.0035	0.0052	0.0017	50
	มีจตุรองรับ	2	0.0035	0.0041	0.0006	17
คานขอมแซม 150x75x200 mm	ปล่อยอิสระ	2	0.0022	0.0037	0.0015	67
	มีจตุรองรับ	2	0.0022	0.0026	0.0004	17

4.2.3.2.1 ผลการทดลองการเทคอนกรีตด้วยโดรนลงบนแบบหล่อลูกบาศก์

การเทคอนกรีตโดยใช้โดรนลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 150 × 150 × 150 มิลลิเมตร ดำเนินการโดยให้คอนกรีตไหลลงบนแบบหล่อที่มีจตุรองรับ แสดงดังภาพที่ 4-21 หลังจากทำการเทคอนกรีตเสร็จสิ้น ได้ตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ตามที่แสดงในภาพที่ 4-22 ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะของการกระจายตัวของวัสดุ เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัว พื้นผิวของลูกบาศก์คอนกรีตมีลักษณะตามที่แสดงในภาพที่ 4-23 จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 1881 : PART 4 โดยกระบวนการทดสอบนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่เทด้วยโดรนกับคอนกรีตที่เทด้วยวิธีปกติ ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจากทั้งสองวิธีการ แสดงดังภาพที่ 4-24



ภาพที่ 4-21 โดรนขณะเทคอนกรีตของแบบหล่อลูกบาศก์

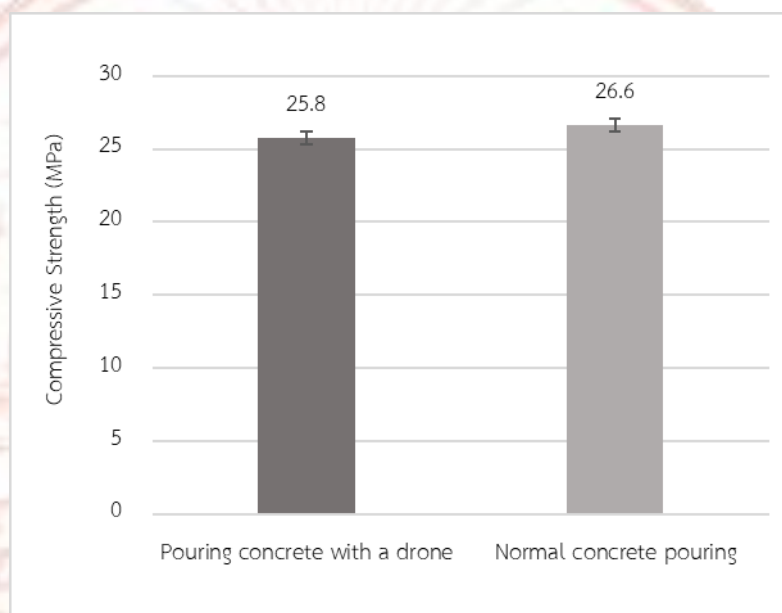


ภาพที่ 4-22 หลังจากการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแบบหล่อลูกบาศก์



ภาพที่ 4-23 พื้นผิวลูกบาศก์คอนกรีตอัดแรง

จากภาพที่ 4-24 ด้านกำลังรับแรงอัดพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนมีค่าใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ โดยค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนเท่ากับ 25.8 เมกะปาสคาล ซึ่งใกล้เคียงกับค่ากำลังรับแรงอัดของการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติที่เท่ากับ 26.6 เมกะปาสคาล ดังนั้น ค่ากำลังรับแรงอัดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนลดลง 3.01% เมื่อเทียบกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ แสดงให้เห็นว่าการใช้โดรนในการเทคอนกรีตสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความสม่ำเสมอและใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตแบบปกติ



ภาพที่ 4-24 ค่ากำลังรับแรงอัดในแบบหล่อลูกบาศก์

4.2.3.2.2 ผลการทดลองเทคอนกรีตด้วยโดรนลงบนแบบหล่อคาน

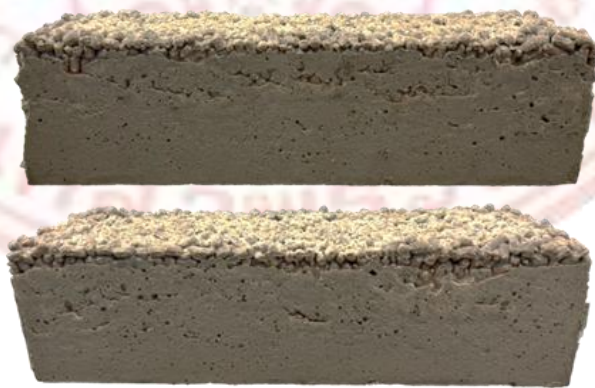
การเทคอนกรีตโดยใช้โดรนลงบนแบบหล่อทรงคานขนาด 100 x 100 x 350 มิลลิเมตร ดำเนินการโดยให้คอนกรีตไหลลงบนแบบหล่อที่มีจุดรองรับแสดงดังภาพที่ 4-25 หลังจากทำการเทคอนกรีตเสร็จสิ้น ได้ตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อทรงคานแสดงดังภาพที่ 4-26 เมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัว พื้นผิวของคานคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 4-27 ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะของการกระจายตัวของวัสดุและการไหลของคอนกรีตที่เกิดขึ้นระหว่างการเท จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 โดยกระบวนการทดสอบนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่เทด้วยโดรนกับคอนกรีตที่เทด้วยวิธีปกติ ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตจากทั้งสองวิธีการแสดงดังภาพที่ 4-28



ภาพที่ 4-25 โดรนขณะเทคอนกรีตของแบบหล่อคาน

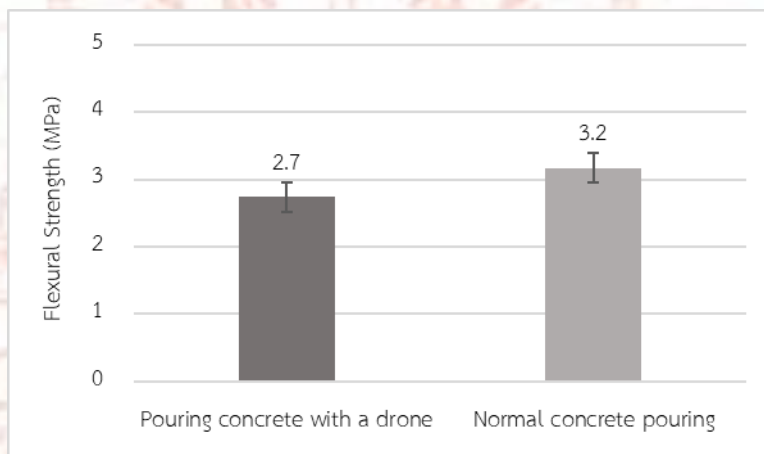


ภาพที่ 4-26 หลังจากการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแบบหล่อคาน



ภาพที่ 4-27 พื้นผิวคานคอนกรีตตอนแข็งตัว

จากภาพที่ 4-28 ด้านกำลังรับแรงดัดพบว่า ค่ากำลังรับแรงดัดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนมีค่าใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ โดยค่ากำลังรับแรงดัดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนเท่ากับ 2.7 เมกะปาสกาล ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดัดใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติเท่ากับ 3.2 เมกะปาสกาล ดังนั้นค่ากำลังรับแรงดัดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนลดลง 15.6% เมื่อเทียบกับการเทคอนกรีตในรูปแบบปกติ ซึ่งการลดลงของค่ากำลังรับแรงดัดเกิดจากแรงกระแทกในระหว่างที่คอนกรีตถูกเทลงจากโดรน อีกทั้งแรงลมที่เกิดขึ้นระหว่างการเทคอนกรีตด้วยโดรนทำให้รบกวนทิศทางและความสม่ำเสมอของการตกกระทบคอนกรีต ส่งผลให้ความหนาแน่นและการจัดเรียงตัวของคอนกรีตในบางจุดไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 4-28 ค่ากำลังรับแรงดัดในแบบหล่อคาน

4.2.3.2.3 ผลการเทคอนกรีตด้วยโดรนลงบนแบบหล่อคานซ่อมแซม

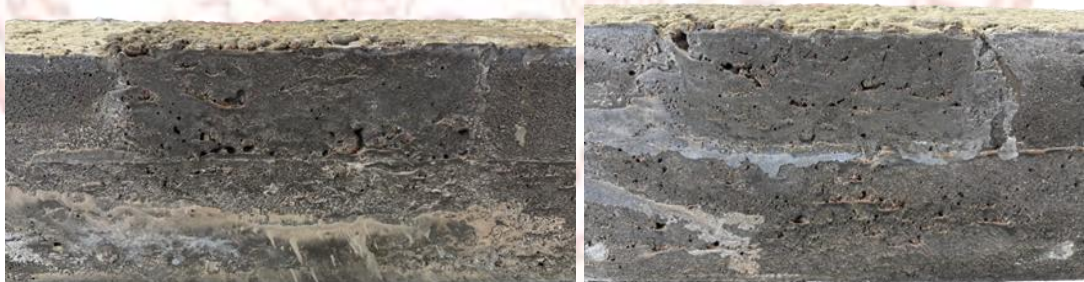
หลังจากทำการเทคอนกรีตด้วยโดรนลงบนแบบหล่อคานซ่อมแซม ขนาด $150 \times 75 \times 200$ มิลลิเมตร โดยใช้จู่ดรองรับคอนกรีตและใส่เหล็กเสริมขนาด 9 มิลลิเมตร พร้อมเหล็กปลอกที่มีระยะห่าง 5 เซนติเมตร เพื่อจำลองการเทคอนกรีตผ่านสิ่งกีดขวางในงานซ่อมแซม ตามที่แสดงในภาพที่ 4-29 เมื่อการเทคอนกรีตเสร็จสิ้น ได้ตัวอย่างคอนกรีตในแบบหล่อทรงลูกบาศก์ ตามที่แสดงในภาพที่ 4-30 หลังจากคอนกรีตเริ่มแข็งตัว พบว่าพื้นผิวของลูกบาศก์คอนกรีตมีลักษณะดังที่แสดงในภาพที่ 4-31 จากนั้น นำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มเป็นระยะเวลา 28 วัน และดำเนินการทดสอบกำลังรับแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM C78 ตามที่แสดงในภาพที่ 4-32



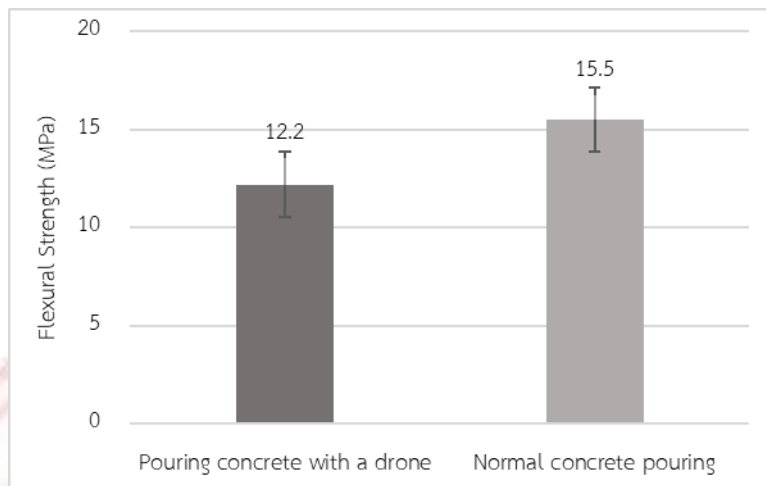
ภาพที่ 4-29 โดรนขณะเทคอนกรีตของแบบหล่อคานซ่อมแซม



ภาพที่ 4-30 หลังจากการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแบบหล่อคานซ่อมแซม



ภาพที่ 4-31 พื้นผิวคานซ่อมแซมคอนกรีตตอนแข็งตัว



ภาพที่ 4-32 ค่ากำลังรับแรงดัดในแบบหล่อคานซ่อมแซม

จากภาพที่ 4-32 ค่ากำลังรับแรงดัดของการเทคอนกรีตด้วยโดรนมีความใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตแบบปกติ โดยค่ากำลังรับแรงดัดของการเทด้วยโดรนอยู่ที่ 12.2 เมกะปาสกาล ขณะที่การเทแบบปกติอยู่ที่ 15.5 เมกะปาสกาล ซึ่งค่าดังกล่าวของการเทด้วยโดรนต่ำกว่าการเทแบบปกติประมาณ 3.3 เมกะปาสกาล หรือ 21.3% สาเหตุหลักมาจากการเทคอนกรีตจากอากาศที่ทำให้เกิดฟองอากาศหรือช่องว่างมากกว่าการเทแบบปกติ ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำกว่า ส่งผลให้กำลังรับแรงดัดลดลง อย่างไรก็ตาม ด้านการเทคอนกรีตด้วยโดรนผ่านสิ่งกีดขวางพบว่า สามารถในการเทคอนกรีตผ่านเหล็กเสริมได้ดี สามารถเติมเต็มช่องว่างและไหลเข้าแบบได้ดี อีกทั้งมีความสามารถในการรับแรงดัดที่ใกล้เคียงกับการเทแบบปกติ

นอกจากนี้ การใช้งานโดรนในการซ่อมแซมช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการดำเนินงาน เนื่องจากโดรนสามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการซ่อมแซมได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง ลดระยะเวลาที่ต้องใช้สำหรับการขนย้ายเครื่องมือและวัสดุในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก เช่น บริเวณที่มีพื้นที่แคบหรือจุดสูงที่ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ทั่วไปได้อย่างสะดวก

4.3 ผลจากกรณีศึกษางานเทคอนกรีตด้วยโดรนของบ้านชั้นเดียวในสภาพการทำงานจริง

การจำลองสถานการณ์เกิดจากเงื่อนไขของพื้นที่การก่อสร้างที่ตั้งอยู่ในชุมชนแออัดและแคบรถคอนกรีตไม่สามารถเข้าถึง ซึ่งการใช้วิธีเทคอนกรีตแบบปกติด้วยรถเทคอนกรีตเป็นไปไม่ได้ ในกรณีนี้การใช้โดรนเพื่อช่วยในการขนส่งและเทคอนกรีตจึงกลายเป็นหนึ่งในทางเลือกที่นำมาพิจารณาประยุกต์ใช้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- จุดเตรียมวัสดุคอนกรีต เป็นจุดเริ่มต้นที่มีการจัดเก็บและเตรียมคอนกรีตสำหรับการก่อสร้าง โดยตั้งอยู่ห่างจากตำแหน่งบ้านที่ทำการเทคอนกรีตประมาณ 50 เมตร

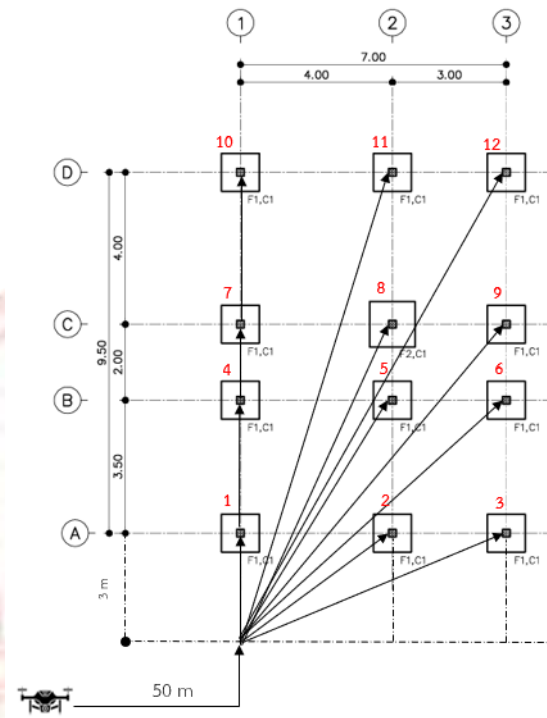
15 กิโลกรัม โดยที่น้ำหนักของตัวถังอยู่ที่ 5.4 กิโลกรัม ดังนั้นรวมน้ำหนักที่โดรนต้องแบกทั้งหมด 20.4 กิโลกรัม นอกจากนี้จากข้อมูลการศึกษาประสิทธิภาพการบินของโดรนทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับปัจจัยสำคัญ ได้แก่ อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า และเวลาในการบิน โดยสามารถประมาณค่าได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกทุกส่วนการบินโดรนที่มีการทดสอบกริด ใช้ข้อมูลเฉพาะอัตราการใช้พลังงานทดสอบกริด แสดงดังตารางที่ 4-8 ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้นำไปประยุกต์กับการทดสอบกริดด้วยโดรนของบ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 1

ตารางที่ 4-8 อัตราพลังงานและเวลาที่ใช้ในการบินกับทดสอบกริดด้วยโดรน

อัตราพลังงานและเวลาที่ใช้ในการบินกับทดสอบกริดด้วยโดรน			
น้ำหนักคอนกรีต+ถัง 20.4 กิโลกรัม	อัตราพลังงานบินโดรน	0.0292	Wh/m/s
	เวลาในการบินโดรนที่ระยะทาง 50 เมตร	98	sec
น้ำหนักถังบรรจุคอนกรีต 5.4 กิโลกรัม	อัตราพลังงานบินโดรน	0.0142	Wh/m/s
	เวลาในการบินโดรนที่ระยะทาง 50 เมตร	113	sec
น้ำหนักคอนกรีต 15 กิโลกรัม	อัตราพลังงานทดสอบกริด	0.132	Wh/kg/s
	เวลาในการทดสอบกริด	42.76	sec

4.3.1 ผลการทดสอบกริดด้วยโดรนสำหรับแปลนฐานรากและเสาของบ้านชั้นเดียว

ทิศทางการบินของโดรนในการทดสอบกริดสำหรับแปลนฐานรากและเสา เริ่มต้นจากจุดเตรียมคอนกรีตซึ่งตั้งอยู่ห่างจากตัวบ้านประมาณ 50 เมตร โดยโดรนบินที่ความสูง 5 เมตร เมื่อถึงตำแหน่งที่กำหนดสำหรับการทดสอบกริดตามจุดฐานราก 12 จุด และเสา 12 จุด ดังที่แสดงในภาพที่ 4-34 โดรนหยุดที่แต่ละจุดเพื่อทดสอบกริดลงไปยังจุดรองรับที่ได้เตรียมไว้ในแต่ละตำแหน่ง



ภาพที่ 4-34 ทิศทางการบินโดรนในการเทคอนกรีตของแปลนฐานรากและเสา

จากตารางที่ 4-9 พบว่าปริมาณคอนกรีตที่ต้องเทคือ 3.732 ลูกบาศก์เมตร โดยโดรนต้องทำการขนส่งคอนกรีตทั้งหมด 445 รอบ สำหรับพลังงานที่ใช้ในการบินรวมทั้งหมดอยู่ที่ 96.93 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่พลังงานที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมทั้งหมดเท่ากับ 38.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ระยะเวลารวมในการบินทั้งหมดเท่ากับ 36 ชั่วโมง 44 นาที และระยะเวลาเทคอนกรีตรวมเท่ากับ 5 ชั่วโมง 24 นาที

ตารางที่ 4-9 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนฐานราก

รายการ	ปริมาณ คอนกรีต (m^3)	จำนวน รอบเท คอนกรีต	ระยะทาง ต่อรอบบิน (m)	เวลาบิน ต่อรอบ (s)	พลังงานบิน รอบทั้งหมด (Wh)	พลังงานเท รอบทั้งหมด (Wh)	เวลาบิน รอบทั้งหมด (min)	เวลาเท รอบทั้งหมด (min)
1.ฐานราก F1	0.3	37	126.0	265	6,477	3,104	162	26
2.ฐานราก F1	0.3	37	130.0	274	6,895	3,104	167	26
3.ฐานราก F1	0.3	37	135.2	285	7,462	3,104	174	26
4.ฐานราก F1	0.3	37	133.0	280	7,217	3,104	171	26
5.ฐานราก F1	0.3	37	135.3	285	7,464	3,104	174	26
6.ฐานราก F1	0.3	37	139.1	293	7,894	3,104	178	26
7.ฐานราก F1	0.3	37	137.0	288	7,658	3,104	176	26
8.ฐานราก F2	0.43	53	138.8	292	11,319	4,470	256	38

ตารางที่ 4-9 (ต่อ)

รายการ	ปริมาณ คอนกรีต (m ³)	จำนวน รอบเท คอนกรีต	ระยะทางต่อ รอบบิน (m)	เวลาบิน ต่อรอบ (s)	พลังงานบิน รอบทั้งหมด (Wh)	พลังงานเท รอบทั้งหมด (Wh)	เวลาบิน รอบทั้งหมด (min)	เวลาเท รอบทั้งหมด (min)
9.ฐานราก F1	0.3	37	142.0	299	8,227	3,104	182	26
10.ฐานราก F1	0.3	37	145.0	305	8,578	3,104	186	26
11.ฐานราก F1	0.3	37	146.2	308	8,725	3,104	188	26
12.ฐานราก F1	0.3	37	148.7	313	9,017	3,104	191	26
รวม	3.732	445	1,656	3,486	96,932	38,614	2,204	324

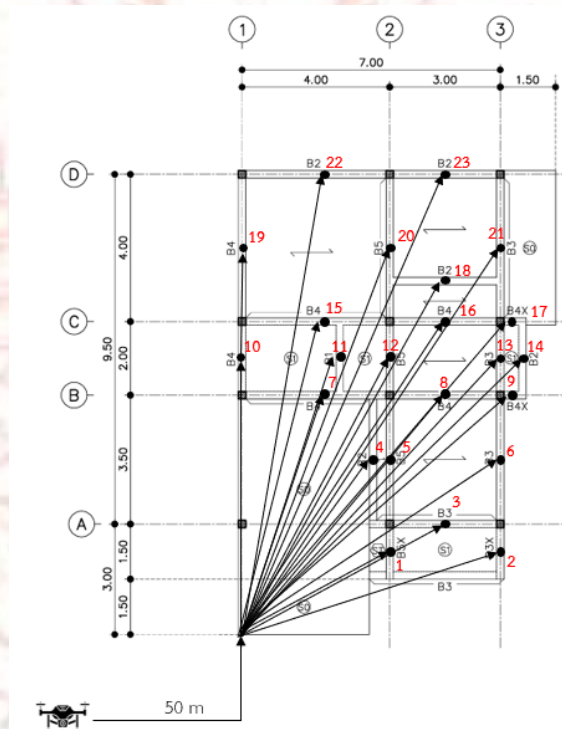
จากตารางที่ 4-10 ซึ่งแสดงรายละเอียดการเทคอนกรีตสำหรับเสาโดยใช้โดรน พบว่าปริมาณคอนกรีตที่ต้องเททั้งหมดคือ 1.056 ลูกบาศก์เมตร โดยโดรนต้องทำการขนส่งคอนกรีตทั้งหมด 129 รอบ สำหรับพลังงานที่ใช้ในการบินรวมทั้งหมดอยู่ที่ 25.86 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่พลังงานที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมทั้งหมดเท่ากับ 10.93 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ระยะเวลารวมในการบินทั้งหมดเท่ากับ 10 ชั่วโมง 5 นาที และระยะเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมเท่ากับ 1 ชั่วโมง 32 นาที

ตารางที่ 4-10 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนเสา

รายการ	ปริมาณ คอนกรีต (m ³)	จำนวน รอบเท คอนกรีต	ระยะทาง ต่อรอบบิน (m)	เวลาบิน ต่อรอบ (s)	พลังงานบิน รอบทั้งหมด (Wh)	พลังงานเท รอบทั้งหมด (Wh)	เวลาบิน รอบทั้งหมด (min)	เวลาเท รอบทั้งหมด (min)
1.เสา C1	0.088	11	122.0	257	1,781	911	46	8
2.เสา C1	0.088	11	126.0	265	1,900	911	47	8
3.เสา C1	0.088	11	131.2	276	2,061	911	49	8
4.เสา C1	0.088	11	129.0	272	1,992	911	49	8
5.เสา C1	0.088	11	131.3	276	2,062	911	49	8
6.เสา C1	0.088	11	135.1	284	2,184	911	51	8
7.เสา C1	0.088	11	133.0	280	2,117	911	50	8
8.เสา C1	0.088	11	134.8	284	2,175	911	51	8
9.เสา C1	0.088	11	138.0	290	2,279	911	52	8
10.เสา C1	0.088	11	141.0	297	2,379	911	53	8
11.เสา C1	0.088	11	142.2	299	2,421	911	54	8
12.เสา C1	0.088	11	144.7	304	2,504	911	54	8
รวม	1.056	129	1,608	3,385	25,856	10,926	605	92

4.3.2 ผลการเทคอนกรีตด้วยโดรนสำหรับแปลนคานพื้นชั้น 1 ของบ้านชั้นเดียว

ทิศทางการบินของโดรนในการเทคอนกรีตสำหรับแปลนคานพื้นชั้น 1 เริ่มต้นจากจุดเตรียมคอนกรีตซึ่งอยู่ห่างจากตัวบ้านประมาณ 50 เมตร โดยโดรนบินที่ความสูง 5 เมตร เมื่อโดรนบินถึงจุดเทคอนกรีตที่กำหนดไว้ตามตำแหน่งของคานพื้นชั้น 1 ทั้งหมด 23 จุด ดังแสดงในภาพที่ 4-35 โดรนหยุดที่กึ่งกลางคานแต่ละจุดเพื่อทำการเทคอนกรีตโดยมีจุดรองรับในแต่ละจุดที่กำหนด จากนั้นทำการบิน โดรนกลับยังจุดเริ่มต้น เพื่อเตรียมการเติมคอนกรีตใหม่สำหรับการเทในรอบถัดไป โดยทิศทางการบินในฉากกลับยังคงใช้ความสูงที่ 5 เมตร



ภาพที่ 4-35 ทิศทางการบินโดรนในการเทคอนกรีตของแปลนคานพื้นชั้น 1

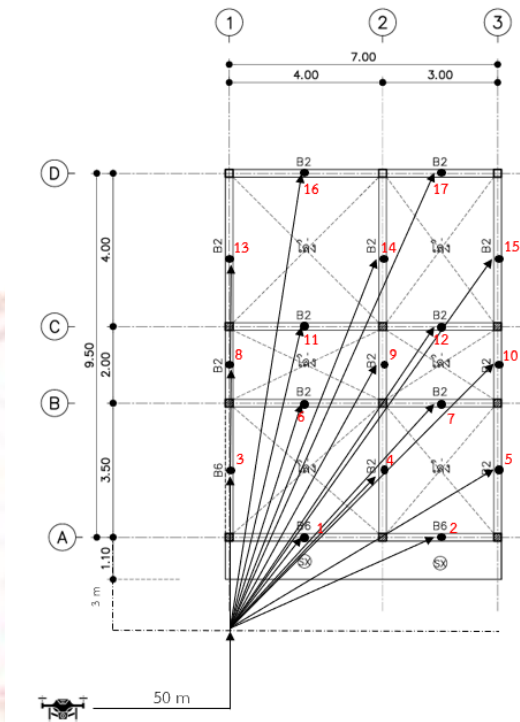
จากตารางที่ 4-11 แสดงรายละเอียดการเทคอนกรีตของคานพื้นชั้น 1 โดยใช้โดรน พบว่าปริมาณคอนกรีตที่ต้องเททั้งหมดคือ 5.026 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งโดรนต้องบินขนส่งคอนกรีตทั้งหมด 613 รอบ สำหรับพลังงานที่ใช้ในการบินรวมทั้งหมดอยู่ที่ 131.51 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่พลังงานที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมทั้งหมดเท่ากับ 52 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ระยะเวลารวมในการบินทั้งหมดเท่ากับ 49 ชั่วโมง 40 นาที และระยะเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมเท่ากับ 7 ชั่วโมง 17 นาที

ตารางที่ 4-11 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนคานพื้นชั้น 1

รายการ	ปริมาณ คอนกรีต (m ³)	จำนวน รอบเท คอนกรีต	ระยะทาง ต่อรอบบิน (m)	เวลาบิน ต่อรอบ (s)	พลังงานบิน รอบทั้งหมด (Wh)	พลังงานเท รอบทั้งหมด (Wh)	เวลาบิน รอบทั้งหมด (min)	เวลาเท รอบทั้งหมด (min)
1.คานพื้น B5X	0.12	15	129.2	272	2,723	1,242	66	10
2.คานพื้น B3X	0.12	15	134.7	284	2,961	1,242	69	10
3.คานพื้น B3	0.24	29	132.5	279	5,732	2,483	136	21
4.คานพื้น B2	0.28	34	132.0	278	6,635	2,897	158	24
5.คานพื้น B5	0.28	34	132.4	279	6,675	2,897	159	24
6.คานพื้น B3	0.28	34	136.9	288	7,139	2,897	164	24
7.คานพื้น B4	0.32	39	133.6	281	7,768	3,311	183	28
8.คานพื้น B4	0.24	29	137.0	288	6,126	2,483	141	21
9.คานพื้น B4X	0.048	6	139.5	294	1,270	497	29	4
10.คานพื้น B4	0.16	20	135.0	284	3,966	1,655	92	14
11.คานพื้น B1	0.09	11	135.8	286	2,257	931	52	8
12.คานพื้น B5	0.16	20	137.0	288	4,084	1,655	94	14
13.คานพื้น B3	0.16	20	140.5	296	4,297	1,655	96	14
14.คานพื้น B2	0.16	20	140.9	296	4,317	1,655	96	14
15.คานพื้น B4	0.32	39	137.5	289	8,223	3,311	188	28
16.คานพื้น B4	0.24	29	140.2	295	6,419	2,483	144	21
17.คานพื้น B4X	0.048	6	142.3	300	1,323	497	29	4
18.คานพื้น B2	0.24	29	142.8	301	6,658	2,483	147	21
19.คานพื้น B4	0.32	39	141.0	297	8,652	3,311	193	28
20.คานพื้น B5	0.32	39	142.5	300	8,835	3,311	195	28
21.คานพื้น B3	0.32	39	145.2	306	9,180	3,311	199	28
22.คานพื้น B2	0.32	39	145.3	306	9,190	3,311	199	28
23.คานพื้น B2	0.24	29	147.3	310	7,084	2,483	151	21
รวม	5.026	613	3,181.2	6,696	131,513	52,003	2,980	437

4.3.3 ผลการเทคอนกรีตด้วยโดรนสำหรับแปลนเสของบ้านชั้นเดียว

กระบวนการบินของโดรนเพื่อทำการเทคอนกรีตในงานก่อสร้างแปลนเส เริ่มต้นจาก จุดเตรียมคอนกรีต ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากตัวบ้านประมาณ 50 เมตร โดยโดรนได้รับการตั้งค่าบินที่ความสูงคงที่ 5 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เมื่อโดรนบินถึงตำแหน่งที่กำหนดสำหรับการเทคอนกรีต โดรนทำการหยุดนิ่งที่ตำแหน่งที่เป็นกึ่งกลางของคานแต่ละจุด โดยมีทั้งหมด 17 จุด ตามที่แสดงในภาพที่



ภาพที่ 4-36 ทิศทางการบินโดรนในการเทคอนกรีตของแปลนอเส

จากตารางที่ 4-12 แสดงรายละเอียดการเทคอนกรีตของอเสโดยใช้โดรน พบว่าปริมาณคอนกรีตที่ต้องเททั้งหมดคือ 4.52 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งโดรนต้องบินขนส่งคอนกรีตทั้งหมด 551 รอบ สำหรับพลังงานที่ใช้ในการบินรวมทั้งหมดอยู่ที่ 104.35 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ในขณะที่พลังงานที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมทั้งหมดเท่ากับ 46.77 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ระยะเวลารวมในการบินทั้งหมดเท่ากับ 41 ชั่วโมง 57 นาที และระยะเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีตรวมเท่ากับ 6 ชั่วโมง 33 นาที

ตารางที่ 4-12 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนอเส

รายการ	ปริมาณ คอนกรีต (m ³)	จำนวน รอบเท คอนกรีต	ระยะทาง ต่อรอบบิน (m)	เวลาบิน ต่อรอบ (s)	พลังงานบิน รอบทั้งหมด (Wh)	พลังงานเท รอบทั้งหมด (Wh)	เวลาบิน รอบ ทั้งหมด (s)	เวลาเท รอบ ทั้งหมด (s)
1.อเส B6	0.32	39	119.7	252	6,238	3,311	164	28
2.อเส B6	0.24	29	125.1	263	5,108	2,483	128	21
3.อเส B6	0.28	34	122.0	257	5,668	2,897	146	24
4.อเส B2	0.28	34	123.7	260	5,831	2,897	148	24
5.อเส B2	0.28	34	129.5	273	6,386	2,897	155	24
6.อเส B2	0.32	39	126.1	265	6,920	3,311	173	28
7.อเส B2	0.24	29	129.5	273	5,474	2,483	133	21

ตารางที่ 4-12 (ต่อ)

รายการ	ปริมาณ คอนกรีต (m ³)	จำนวน รอบเท คอนกรีต	ระยะทาง ต่อรอบบิน (m)	เวลาบิน ต่อรอบ (s)	พลังงานบิน รอบทั้งหมด (Wh)	พลังงานเท รอบทั้งหมด (Wh)	เวลาบิน รอบทั้งหมด (min)	เวลาเท รอบทั้งหมด (min)
8.อเส B2	0.16	20	127.5	268	3,537	1,655	87	14
9.อเส B2	0.16	20	129.5	273	3,649	1,655	89	14
10.อเส B2	0.16	20	133.1	280	3,855	1,655	91	14
11.อเส B2	0.32	39	130.0	274	7,350	3,311	178	28
12.อเส B2	0.24	29	132.7	279	5,748	2,483	136	21
13.อเส B2	0.32	39	133.5	281	7,756	3,311	183	28
14.อเส B2	0.32	39	135.0	284	7,929	3,311	185	28
15.อเส B2	0.32	39	137.7	290	8,257	3,311	189	28
16.อเส B2	0.32	39	137.8	290	8,266	3,311	189	28
17.อเส B2	0.24	29	139.8	294	6,381	2,483	144	21
รวม	4.52	551	2,212.3	4,656	104,351	46,768	2,517	393

จากตารางที่ 4-9 ถึง 4-12 สรุปความสัมพันธ์ของระยะทางต่อรอบบินกับพลังงานที่ใช้ โดยพบว่าเมื่อระยะทางต่อรอบบินเพิ่มขึ้น พลังงานที่ใช้ในการบินก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการขนส่งคอนกรีตไปยังจุดเทที่ไกลกว่า นอกจากนี้ ปริมาณคอนกรีตที่ต้องการเทมีผลโดยตรงต่อจำนวนรอบที่ต้องใช้ในการขนส่ง ซึ่งเมื่อปริมาณคอนกรีตเพิ่มขึ้น จำนวนรอบบินก็ต้องเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานและเวลาที่ใช้ในการขนส่งและเทคอนกรีตเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ เมื่อจำนวนรอบบินเพิ่มขึ้น ระยะเวลากการบินรวมและพลังงานรวมก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากต้องใช้เวลาและพลังงานมากขึ้นในแต่ละรอบของการขนส่งและเทคอนกรีต

จากตารางที่ 4-13 ซึ่งแสดงข้อมูลเกี่ยวกับการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนในแต่ละส่วนของแปลนบ้าน โดยสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณคอนกรีตและจำนวนรอบ: ในการเทคอนกรีตปริมาณ 14.33 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้จำนวนรอบการขนส่งถึง 1,748 รอบ ซึ่งถือเป็นจำนวนรอบที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากโดรนที่ใช้ในการเทคอนกรีตมีความสามารถในการบรรทุกที่จำกัด ส่งผลให้จำนวนรอบการขนส่งเพิ่มขึ้นและทำให้เวลาที่ใช้ในการขนส่งค่อนข้างนาน
- พลังงานไฟฟ้าและระยะทาง: พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการขนส่งและการเทคอนกรีตทั้งหมดคือ 506.96 กิโลวัตต์-ชั่วโมง โดยระยะทางบินรวมที่โดรนต้องบินคือ 8,658 เมตร
- เวลาที่ใช้: เวลาที่ใช้ในการขนส่งและการเทคอนกรีตทั้งหมด 159 ชั่วโมง หรือ ประมาณ 20 วัน (คิดระยะเวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน) ซึ่งเป็นเวลาค่อนข้างนานสำหรับการเทคอนกรีต

- ในหนึ่งพื้นที่ หากสามารถเพิ่มจำนวนโดรนหรือเพิ่มประสิทธิภาพการบรรทุกของโดรน ทำให้เวลาทำงานโดยรวมลดลงได้อย่างมาก

จากการพิจารณาพบว่า การบินโดรนในการเทคอนกรีตในพื้นที่จำกัดมีข้อดีในด้านการเข้าถึงพื้นที่และลดจำนวนแรงงาน อย่างไรก็ตาม ยังคงมีข้อจำกัดในด้านเวลาที่ใช้และจำนวนรอบการขนส่งที่สูง การเพิ่มขนาดของโดรนหรือการเพิ่มจำนวนโดรนสามารถช่วยลดจำนวนรอบการขนส่งและเวลาที่ใช้ในการเทคอนกรีต ทำให้กระบวนการดำเนินงานเร็วขึ้นและลดเวลาทำงานได้

ตารางที่ 4-13 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยโดรนของแปลนบ้านชั้นเดียว

รายการ	ปริมาณคอนกรีต (m ³)	จำนวนรอบเทคอนกรีต	ระยะทางทั้งหมด (m)	พลังงานที่ใช้บินและเทคอนกรีตของจำนวนรอบทั้งหมด (kWh)	เวลาบินและเทคอนกรีตของจำนวนรอบทั้งหมด (hr.)
1.ฐานราก	3.73	455	1,656	135.55	42
2.เสา	1.06	129	1,608	36.83	12
3.คานพื้นชั้น 1	5.03	613	3,181	183.52	57
4.อเส	4.52	551	2,213	151.12	48
รวม	14.33	1,748	8,658	506.96	159

4.3.4 ผลการเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มลากของแปลนบ้านชั้นเดียว

จากตารางที่ 4-14 แสดงรายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มลากของบ้านชั้นเดียว โดยรถปั๊มลากคอนกรีตที่ใช้เปรียบเทียบกับรุ่น EVERDIGM (ETP490) แสดงดังภาพที่ 4-37 [49] มีประสิทธิภาพในการทำงาน 70% และสามารถเทคอนกรีตได้ปริมาตร 28 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยมีปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลที่ 2 ลิตรต่อการเทคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมด 290.03 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อการเทคอนกรีตที่ 14.33 ลูกบาศก์เมตร และเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการเทคอนกรีตคือ 30.7 นาที



ภาพที่ 4-37 รถปั๊มลาก EVERDIGM รุ่น ETP490 [49]

ตารางที่ 4-14 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มลากของบ้านชั้นเดียว

การเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มลากของแปลนบ้านชั้นเดียว		
ปริมาณปั๊มคอนกรีตได้สูงสุด	40	m ³ /hr
ประสิทธิภาพการทำงานปั๊ม	70	%
ปริมาณปั๊มคอนกรีตได้	28	m ³ /hr
รถปั๊มลากใช้น้ำมันดีเซล	2	L/m ³
อัตราการใช้ น้ำมันดีเซล	56	L/hr
น้ำมันดีเซล มีค่าพลังงานไฟฟ้า	36.42	MJ/L
รถปั๊มลากใช้พลังงานไฟฟ้า	2039.52	MJ/hr
ค่าพลังงานไฟฟ้า	3.6	MJ/kWh
รถปั๊มลากใช้พลังงานไฟฟ้า	566.53	kWh/hr
ปริมาณคอนกรีตที่เทแปลนบ้าน	14.33	m ³
เวลาที่ใช้ปั๊มคอนกรีต	30.7	min
รถปั๊มใช้พลังงานไฟฟ้า	290.03	kWh

จากตารางที่ 4-15 ด้านพลังงานพบว่า รถปั๊มลากมีความได้เปรียบด้านการใช้พลังงานต่อหน่วย เนื่องจากระบบปั๊มมีความสามารถลำเลียงในปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น ทำให้พลังงานที่ใช้ต่อปริมาตรต่ำกว่าโดรนที่ต้องเดินทางซ้ำหลายเที่ยว ส่วนด้านเวลาพบว่า รถปั๊มมีความเร็วและประสิทธิภาพในการเทสูงกว่าโดรน โดยสามารถเทคอนกรีตเสร็จในเวลาน้อยกว่าหนึ่งชั่วโมง ในขณะที่โดรนต้องใช้เวลามากกว่าหนึ่งชั่วโมง ดังนั้นการเลือกใช้ระบบการเทคอนกรีตที่เหมาะสมควรพิจารณาจากลักษณะงานและข้อจำกัดของพื้นที่ หากเป็นโครงการในพื้นที่เปิดโล่งและต้องการความรวดเร็ว รถปั๊มคอนกรีตเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถเทคอนกรีตในปริมาณมากได้ในเวลาสั้น ในขณะที่โดรนเหมาะสำหรับโครงการที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ เช่น ชุมชนที่มีพื้นที่จำกัดหรือพื้นที่ที่รถปั๊มไม่สามารถเข้าถึงได้ ทั้งนี้ การศึกษาชี้ให้เห็นว่าควรสามารถปรับใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการได้

ตารางที่ 4-15 การเปรียบเทียบผลการเทคอนกรีตระหว่างรถปั๊มลากและโดรนของบ้านชั้นเดียว

หัวข้อ	รถปั๊มลาก	โดรน
พลังงานไฟฟ้า	ใช้พลังงานต่อหน่วยต่ำ (20.2 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.)	ใช้พลังงานต่อหน่วยสูง (35.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.)
เวลาที่ใช้	รวดเร็ว (30.7 นาที)	ใช้เวลามาก (159 ชั่วโมง)
ประสิทธิภาพ	เทคอนกรีตในปริมาณมากในเวลาสั้น	จำกัดปริมาณต่อเที่ยว

4.3.5 ผลการเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มบูมในแปลนบ้านชั้นเดียว

จากตารางที่ 4-16 แสดงรายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มบูมในบ้านชั้นเดียว โดยรถปั๊มบูมคอนกรีตที่ใช้เปรียบเทียบคือ EVERDIGM รุ่น ECP43 CX-5 แสดงดังภาพที่ 4-38 [49] มีประสิทธิภาพในการทำงาน 70% และสามารถเทคอนกรีตได้ปริมาตร 35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยมีปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลที่ 5 ลิตรต่อการเทคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร เมื่อคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมด 725.06 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อการเทคอนกรีตที่ 14.33 ลูกบาศก์เมตร และเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการเทคอนกรีตคือ 24.6 นาที

ตารางที่ 4-16 รายการคำนวณในการเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มบูมในบ้านชั้นเดียว

การเทคอนกรีตด้วยรถปั๊มบูมในแปลนบ้านชั้นเดียว		
ปริมาณปั๊มคอนกรีตได้สูงสุด	50	m ³ /hr
ประสิทธิภาพการทำงานปั๊ม	70	%
ปริมาณปั๊มคอนกรีตได้	35	m ³ /hr
รถปั๊มบูมใช้น้ำมันดีเซล	5	L/m ³
อัตราการใช้น้ำมันดีเซล	175	L/hr
น้ำมันดีเซล มีค่าพลังงานไฟฟ้า	36.42	MJ/L
รถปั๊มบูมใช้พลังงานไฟฟ้า	6373.5	MJ/hr
ค่าพลังงานไฟฟ้า	3.6	MJ/kWh
รถปั๊มบูมใช้พลังงานไฟฟ้า	1,770.42	kWh/hr
ปริมาณคอนกรีตที่เทแปลนบ้าน	14.33	m ³
เวลาที่ใช้ปั๊มคอนกรีต	24.6	min
รถปั๊มใช้พลังงานไฟฟ้า	725.06	kWh



ภาพที่ 4-38 รถปั๊มบูมคอนกรีต EVERDIGM รุ่น ECP43 CX-5 [49]

จากตารางที่ 4-17 ด้านพลังงานพบว่า รถปั๊มบูมมีการใช้พลังงานต่อหน่วยสูงกว่าโดรน เนื่องจากรถปั๊มบูมใช้พลังงานมากในการยกและลำเลียงคอนกรีตในระยะทางไกล ส่วนด้านเวลาพบว่า

ปั๊มบูมสามารถเทคอนกรีตได้ด้วยความเร็วสูงสุด โดยใช้เวลาเพียง 24.6 นาที ในขณะที่โดรนต้องใช้เวลานานที่สุด ดังนั้นการเลือกใช้ระบบการเทคอนกรีตควรพิจารณาจากลักษณะงานและข้อจำกัดของพื้นที่ หากต้องการความรวดเร็วและปริมาณการเทสูง รถปั๊มบูมเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด แต่หากโครงการอยู่ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดในการเข้าถึง โดรนเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า แม้ว่าจะใช้เวลาและพลังงานมากกว่าในบางกรณี

ตารางที่ 4-17 การเปรียบเทียบผลการเทคอนกรีตระหว่างรถปั๊มบูมและโดรนของแปลนบ้านชั้นเดียว

หัวข้อ	รถปั๊มลาก	โดรน
พลังงานไฟฟ้า	ใช้พลังงานต่อหน่วยสูง (50.6 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.)	ใช้พลังงานต่อหน่วยต่ำ (35.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.)
เวลาที่ใช้	ใช้เวลาน้อย (24.6 นาที)	ใช้เวลามาก (159 ชั่วโมง)
ประสิทธิภาพ	เทคอนกรีตในปริมาณมากในเวลาสั้น	จำกัดปริมาณต่อเที่ยว

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 การศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองที่เหมาะสมสำหรับการเทคอนกรีตด้วยโดรน

5.1.1 ด้านการไหลแผ่ การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน และความต้านทานการแยกตัว พบว่า ค่าการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงและปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต

5.1.2 ด้านเวลาการไหลแผ่ถึงระยะเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 50 เซนติเมตร พบว่าเวลาการไหลน้อยลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงและปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต

5.1.3 ด้านหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตพบว่า การเพิ่มสารลดน้ำปริมาณสูงทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตลดลง เนื่องจากช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีตมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง ขณะที่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีตเพิ่มขึ้น

5.1.4 ด้านระยะเวลาการก่อตัวพบว่า การเพิ่มขึ้นของสารลดน้ำปริมาณสูงในสัดส่วนผสม ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถชะลอระยะเวลาในการก่อตัวของคอนกรีต

5.1.5 ด้านกำลังรับแรงอัดและตัดพบว่า ค่ากำลังรับแรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำปริมาณสูงและปริมาณปูนซีเมนต์ในสัดส่วนผสม แต่หากเติมสารลดน้ำปริมาณสูงมากกว่า 5% ของสัดส่วนผสมพบว่ากำลังรับแรงอัดลดลง

5.1.6 ด้านการคัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับเทคอนกรีตด้วยโดรนพบว่า ส่วนผสมปูนซีเมนต์ 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารลดน้ำปริมาณสูงที่ 8% ผ่านเกณฑ์การคัดเลือกตามมาตรฐาน EFNARC 2002 โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 26.6 เมกะปาสคาล และค่าหน่วยน้ำหนักคอนกรีต 1,829 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5.2 การศึกษาความสามารถในการเทคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเองด้วยโดรน

5.2.1 ด้านประสิทธิภาพการบินของโดรนโดยมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุกพบว่า การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการบินและความเร็วหากอยู่ในขีดจำกัดการยก โดยประสิทธิภาพการบินขึ้นอยู่กับทักษะของนักบินเป็นหลัก

5.2.2 ด้านการแผ่กระจายของคอนกรีตในห้องปฏิบัติการและสนามจริงพบว่า การเพิ่มความสูงในการเทคอนกรีตและความเร็วลมทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางการแผ่กระจายคอนกรีตเพิ่มขึ้น โดยสนามจริงแรงลมส่งผลต่อการแผ่กระจายมากกว่าห้องปฏิบัติการ

5.2.3 ด้านการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบปล่อยอิสระพบว่า คอนกรีตกระจายออกนอกแบบหล่อ ส่งผลให้สูญเสียวัสดุและเพิ่มจำนวนรอบในการเทคอนกรีต สาเหตุหลักมาจากการควบคุมโดรนที่ใช้โหมด GPS ซึ่งทำให้เกิดข้อผิดพลาดแบบสุ่ม อีกทั้งสภาพอากาศที่มีลมแรงส่งผลต่อความเสถียรของการบินโดรน การแก้ไขคือการใช้โหมดบังคับด้วยตัวเอง และเสริมจตุรกรับบนแบบหล่อเพื่อลดการสูญเสียวัสดุ

5.2.4 ด้านการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบมีจตุรกรับของแบบหล่อลูกบาศก์ มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด 25.8 เมกะปาสคาล ซึ่งเมื่อเทียบกับการเทแบบปกติที่ 26.6 เมกะปาสคาล พบว่าลดลง 3.01% แสดงให้เห็นว่าการเทคอนกรีตด้วยโดรนให้ผลลัพธ์ที่สม่ำเสมอและใกล้เคียงกับการเทแบบปกติ

5.2.5 ด้านการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบมีจตุรกรับของแบบหล่อคาน พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดอยู่ที่ 2.7 เมกะปาสคาล ลดลง 15.6% เมื่อเทียบกับการเทคอนกรีตแบบปกติที่ 3.2 เมกะปาสคาล การลดลงนี้เกิดจากแรงกระแทกระหว่างการเทคอนกรีตและผลกระทบของแรงลมที่รบกวนทิศทางการตกกระทบของคอนกรีต ส่งผลต่อความหนาแน่นของคอนกรีตในบางจุด

5.2.6 ด้านการเทคอนกรีตด้วยโดรนแบบมีจตุรกรับของแบบหล่อสำหรับคานซ่อมแซมมีกำลังรับแรงอัด 12.2 เมกะปาสคาล ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการเทแบบปกติ อีกทั้งโดรนสามารถเทคอนกรีตผ่านเหล็กเสริมได้ดี สามารถเติมเต็มช่องว่างและไหลเข้าแบบได้ดี

5.3 กรณีศึกษาเกี่ยวกับงานเทคอนกรีตของบ้านชั้นเดียวในสภาพการทำงานจริง

5.3.1 การเทคอนกรีตด้วยโดรนของบ้านชั้นเดียวพบว่า เมื่อระยะทางในการขนส่งคอนกรีตเพิ่มขึ้น ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการขนส่งก็เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปริมาณคอนกรีตที่ต้องการเทส่งผลต่อจำนวนรอบบินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของโดรนและเวลาที่ใช้ในการขนส่งเพิ่มขึ้น

5.3.2 การใช้โดรนในการเทคอนกรีตในพื้นที่จำกัดช่วยเพิ่มการเข้าถึงและลดจำนวนแรงงาน แต่ยังมีข้อจำกัดด้านเวลาที่ใช้และจำนวนรอบการขนส่งที่มากขึ้น การเพิ่มขนาดโดรนหรือจำนวนโดรนสามารถลดจำนวนรอบและเวลาทำงานได้

5.3.3 การเทคอนกรีตระหว่างรถปัมลากับโดรนของแปลนบ้านชั้นเดียวพบว่า รถปัมคอนกรีตมีความได้เปรียบด้านพลังงานและเวลา เนื่องจากสามารถลำเลียงคอนกรีตในปริมาณมากได้อย่างรวดเร็วในเวลาสั้น ทำให้พลังงานที่ใช้ต่อปริมาตรต่ำกว่าโดรน

5.3.4 การเทคอนกรีตระหว่างรถปัมบูมกับโดรนของแปลนบ้านชั้นเดียวพบว่า รถปัมบูมใช้พลังงานต่อหน่วยสูงกว่าโดรน เนื่องจากต้องใช้พลังงานมากในการยกและลำเลียงคอนกรีตระยะไกล แต่มีความได้เปรียบด้านเวลาที่สามารถเทคอนกรีตได้เร็วกว่าโดรน

5.3.5 เลือกวิธีเทคอนกรีตควรคำนึงถึงลักษณะงานและข้อจำกัดของพื้นที่ หากต้องการความรวดเร็วและปริมาณการเทที่มากขึ้น รถปัมลากและรถปัมบูมเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ใน

พื้นที่ที่เข้าถึงยาก โดรนเป็นทางเลือกที่ดีกว่า แม้ว่าใช้เวลาและพลังงานมากกว่ารถปัมลากและรถปัมบูม

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ควรใช้โดรนที่สามารถบรรทุกน้ำหนักมากขึ้น หรือใช้โดรนหลายตัวทำงานร่วมกัน เพื่อลดจำนวนรอบการขนส่งและระยะเวลาในการเทคอนกรีตด้วยโดรน

5.4.2 ควรพัฒนาระบบของโดรนที่สามารถใช้โดรนหลายตัวทำงานพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เกิดการชนกันระหว่างบิน

5.4.3 ควรพัฒนาอุปกรณ์ถังเทคอนกรีตสำหรับโดรนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะช่องปล่อยคอนกรีต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปล่อยคอนกรีต และลดระยะเวลาในการเทคอนกรีต

5.4.4 ควรพัฒนาระบบของโดรนให้มีความเสถียรภาพการบินที่สูงขึ้น เพื่อรับมือกับสภาพอากาศที่มีลมแรง รวมถึงการปรับปรุงระบบควบคุมให้สามารถปรับตัวตามสภาพแวดล้อมได้อย่างเหมาะสม

บรรณานุกรม

- Andrianov, V., Bourmpoula, V., & Chacaltana, J. (2015). *World employment and social outlook: Which sector will create the most jobs?* International Labour Organization. Retrieved from https://www.ilo.org/global/about-the-ilo/multimedia/maps-and-charts/WCMS_337082/lang--en/index.htm
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2565). *การเปลี่ยนแปลงประชากรการเกิดและการตายจากการทะเบียนจำแนกตามเพศ ภาค และจังหวัด พ.ศ. 2555-2564 ฉบับทั่วราชอาณาจักร*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานสถิติแห่งชาติ.
- Paoumnuaywit, P. (2019). *The progress of drone innovation in the air freight transportation industry*. Retrieved From <https://airfreight-logistics.com/th/transportation-drone/>
- Tkáč, M., & Mésároš, P. (2019). Utilizing drone technology in civil engineering. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering*, 14(1), 27-37. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2019-0003>
- PTT Digital. (2564). *สื่องเทรนด 'โดรน' ในอุตสาหกรรมต่างๆ*. Retrieved from <https://www.pttdigitalconnect.com/article/commercial-drone-industry-trends>
- Chapman, A. (2016). *Types of drones: Multi-rotor vs fixed-wing vs single rotor vs hybrid VTOL*. Retrieved from <https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>
- Ghamari, M., Rangel, P., Mehrubeoglu, M., Tewolde, G., & Sherratt, R. S. (2022). Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: A review. *IEEE Access*.
- Chamola, V., Kotes, P., Agarwal, A., Naren, Gupta, N., & Guizani, M. (2021). A comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques. *Ad Hoc Networks*, 1-17.

- Corrigan, F. (2020). *How do drones work and what is drone technology?* Retrieved from <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/what-is-drone-technology-or-how-does-drone-technology-work/>
- Munguía, R., Urzua, S., Bolea, Y., & Grau, A. (2016). Vision-based SLAM system for unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 16(3), 372. <https://doi.org/10.3390/s16030372>
- Report. (2564). “โดรน” อุตสาหกรรมแห่งอนาคต. Retrieved from <https://www.mreport.co.th/news/industry-movement/210-Drone-Industry-Why>
- Raley, D. (2019). *Boeing’s eVTOL cargo air vehicle (CAV)*. The Boeing Company. Retrieved from <https://www.boeing.com/features/highlights/2020/cargo-air-vehicle>
- SUAS News. (2020). *F-drones completes first commercial beyond-visual-line-of-sight (BVLOS) drone delivery in Singapore*. Retrieved from <https://www.suasnews.com/2020/04/f-drones-completes-first-commercial-beyond-visual-line-of-sight-bvlos-drone-delivery-in-singapore/>
- Zitzman, L. (2018). *Drones in construction: How they’re transforming the industry*. Retrieved from <https://www.bigrentz.com/blog/drones-construction>
- Mandirola, M., Casarotti, C., Peloso, S., Lanese, I., Brunesi, E., & Senaldi, I. (2022). Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 72, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102824>
- ICA. (2017). *Drone thermal imaging: The next wave in UAV inspection services*. Retrieved from <https://icaschool.com/2017/02/13/drone-thermal-imaging-next-wave-uav-inspection-services>

รัฐพล พรหมมาศ และจักรพงษ์ ไชยวงศ์. (2564). การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนบังคับขนาดเล็กในการสำรวจตรวจสอบพื้นที่และทำแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่อำเภอแม่แจ่ม โดยชุมชนมีส่วนร่วม. *วารสารนิเทศศาสตร์ปริทัศน์*, 25(2).

ธราวุฒิ บุญเหลือ. (2561). การประยุกต์ใช้เครื่องบินบังคับอัตโนมัติ เพื่อสร้างฐานข้อมูลแบบลองสารสนเทศ อาคารสำหรับงานสถาปัตยกรรมผังเมือง. *วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สจล*, 26(0), 137-147.

De Melo, R. R. S., Costa, D. B., Álvares, J. S., & Irizarry, J. (2017). Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites. *Safety Science*, 98, 174-185.

दनัย เรืองสอน, วิชัย วงศ์วิศิษฐ์, สุชาภัสร์ โชติรักษา, ณัฐวุฒิ หัสดีวิจิตร, ศุภกร สุทธิพันธ์, ภาณุพงศ์ มะโนเย็น, และมีชัย บุญเลิศ. (2022). การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับการบริหารโครงการก่อสร้างทางหลวง. การประชุมวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 27, 27, CEM31-1.

Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, A. P., & Kovac, M. (2014). *3D printing with flying robots*. In *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Hong Kong Convention and Exhibition Center.

BCC News. (2015). *The 3D printer drone aimed at making refuges*. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/av/technology-32407706>

Zhang, K., Chermprayong, P., & Xiao, F. (2022). *Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots*. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04988-4>

ปิติ สุคนธสุขกุล. (2555). *คอนกรีตมวลเบาผสมฟองอากาศหรือชนิดเซลลูลาร์, คอนกรีตพิเศษ*. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภัทรชัย พงศ์โสภา. (2565). *ผนังประกอบที่มีสมรรถนะสูงด้านเสียงและอุณหภูมิ* (วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Federal Highway Administration. (2018). *Fly ash facts for highway engineers*. Retrieved from <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach01.cfm>

ACI Committee 226. (1987). *Use of fly ash in concrete* (ACI 226.3R-87). *ACI Proceedings*, 84(5), 381–409.

Thomas, M. D. A. (2007). *Optimizing the use of fly ash in concrete* (Vol. 5420). Portland Cement Association.

Okamura, H., & Ozawa, K. (1995). Mix-design of self-compacting concrete. *Concrete Library of JSCE*, 25, 107–120.

เฉลิมชัย วัฒนล้ำเลิศ, & สมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2554). *SELF-COMPACTING-CONCRETE และการใช้งานในอุตสาหกรรม*. วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 12, เมษายน.

อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ. (2558). อัตราส่วนผสมและวิธีการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของ Self-Compacting Concrete. วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 25, สิงหาคม.

Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15.

Japanese Society of Civil Engineers. (1998). *Recommendation for self-compacting concrete*.

Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials & Design*, 32(3), 1501–1507.

Mohamad, N., Zulaika, M. S., Samad, A. A. A., Goh, W. I., Hadipramana, J., & Wirdawati, A. (2016). Fresh state and mechanical properties of self-compacting concrete incorporating high volume fly ash. *MATEC Web of Conferences*, 47, 01001. EDP Sciences.

Kurt, M., Aydin, A. C., Gül, M. S., Gül, R., & Kotan, T. (2015). The effect of fly ash to self-computability of pumice aggregate lightweight concrete. *Sadhana*, 40, 1343–1359.

Singh, A., Kumar, R., Mehta, P. K., & Tripathi, D. (2021). Mechanical performance of self-compacting concrete with pozzolanic material. In *Recent Advances in Structural Engineering: Select Proceedings of NCRASE 2020* (pp. 11–20). Springer Singapore.

Sor, N. A. H. (2018). The effect of superplasticizer dosage on fresh properties of self-compacting lightweight concrete produced with coarse pumice aggregate. *Journal of Garmian University*, 5(2), 190–209.

พงศนัย ห้วนท็อก, ถิรวัฒน์ บุญมาปะ และมณฑิตา กะณะศิริ. (2557). การพัฒนาหาลัดส่วนผสมของคอนกรีตประเภทไหลเข้าแบบง่าย เพื่อใช้ในงานเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

Lo, T. Y., Cui, H., Tang, W., & Nadeem, A. (2007). Comparison of workability and mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self-compacting concrete. *Materials Research Innovations*, 11(1), 29–36.

ASTM International. (n.d.). ASTM C1157: Standard performance specification for hydraulic cements.

ASTM International. (n.d.). ASTM C494: Standard specification for chemical admixtures for concrete type G.

EFNARC. (2002). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. Association House, Surrey, UK. Retrieved from www.efnarc.org

ASTM International. (n.d.). ASTM C138: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete.

ASTM International. (n.d.). *ASTM C191: Standard test method for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle.*

British Standards Institution. (n.d.). *BS 1881: Part 4: Method of testing concrete for strength.*

ASTM International. (n.d.). *ASTM C78: Test method for flexural strength of concrete.*

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2564). *แบบแปลนเพื่อประชาชน “บ้านครอบครัวไทยร่วมสมัย 1”*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 12 กันยายน 2567 จาก <https://office.dpt.go.th/construction/th/dream-house/10100>

บริษัท พี เอส ที ทรานสปอร์ต แอนด์ เซอร์วิส จำกัด. (2560). *รถปั๊มปูนคอนกรีต แบรินด์ EVERDIGM*. [ออนไลน์]. สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2567 จาก <https://www.pstgroup.biz/products/brand/16/EVERDIGM>

ภาคผนวก ก
ข้อมูลจำเพาะของโตรน



1. ข้อมูลโดรน รุ่น Heavy-lift Quadcopter UAV

1.1) การออกแบบและสมรรถนะการบิน: โดรนชนิด 4 ใบพัด ขนาดเมื่อกางปีกที่กว้างถึง 1,960 มิลลิเมตร ยาว 1,840 มิลลิเมตร และสูง 750 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ ก-1 โดรนรุ่นนี้สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุดถึง 20 กิโลกรัม เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการขนย้ายสิ่งของ อีกทั้งยังมีความเร็วในการบินสูงสุดที่ 10 เมตรต่อวินาที และสามารถควบคุมระยะไกลถึง 4 กิโลเมตร ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถปฏิบัติงานได้ในพื้นที่กว้างใหญ่โดยไม่ต้องกังวลเรื่องการเชื่อมต่อสัญญาณ



ภาพที่ ก-1 โดรนรุ่น Heavy-lift Quadcopter UAV

1.2) ความปลอดภัยและมาตรฐานการป้องกัน: โดรนรุ่น Heavy-lift Quadcopter UAV มีระบบเรดาร์กันชนรอบทิศทาง ซึ่งช่วยป้องกันการชนและความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างการบิน ทำให้สามารถบินได้อย่างปลอดภัยแม้ในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง นอกจากนี้ โดรนรุ่นนี้ยังมีมาตรฐานการป้องกันฝุ่นและน้ำระดับ IP67 ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่มีฝุ่นละอองหรือความชื้นสูง

1.3) ระบบชาร์จพลังงาน: แท่นชาร์จของโดรนรุ่น Heavy-lift Quadcopter UAV เป็นแท่นชาร์จแบบคู่ (DUO) ของ Ultra Power รุ่น UP1200AC DUO-125 แสดงดังภาพที่ ก-2 ซึ่งรองรับการชาร์จแบตเตอรี่ได้พร้อมกัน 2 ก้อน โดยใช้เวลาชาร์จเพียงประมาณ 30 นาที ทำให้สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง คุณสมบัติหลักของระบบชาร์จนี้มีดังต่อไปนี้

- กระแสการชาร์จ: รองรับกระแสการชาร์จที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.1A ถึง 12A โดยปรับกระแสได้ตามความต้องการของแบตเตอรี่
- โหมดการชาร์จ: มีโหมดการทำงานหลายแบบ เช่น โหมดชาร์จปกติ โหมดจัดเก็บ (Storage) และโหมดชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ประเภท Li-HV (Lithium High Voltage)

- การปรับสมดุลเซลล์แบตเตอรี่: มีสายสำหรับการปรับสมดุลเซลล์แบตเตอรี่เพื่อให้ทุกเซลล์ของแบตเตอรี่ถูกชาร์จอย่างเท่าเทียมกัน ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่



ภาพที่ ก-2 แท่นชาร์จแบบคู่ของ Ultra Power รุ่น UP1200AC DUO-125

1.4) แบตเตอรี่ของโดรน: แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์รุ่น Herewin Flight Battery Pack แสดงดังภาพที่ ก-3 ออกแบบมาเพื่อตอบโจทย์การใช้งานที่ต้องการพลังงานสูง พร้อมระบบระบายความร้อนอัตโนมัติที่ช่วยยืดอายุการใช้งาน เหมาะสำหรับโดรนที่ต้องการพลังงานสูงและมีความทนทาน คุณภาพสูง (High Power, High Quality) คุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่นี้มีดังต่อไปนี้

- ความจุแบตเตอรี่ 16,000 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง
- แรงดันไฟฟ้า 44.4 โวลต์ เหมาะสำหรับโดรนขนาดใหญ่หรือที่ต้องการพลังงานสูง
- พลังงานรวม 710.4 วัตต์-ชั่วโมง แสดงถึงปริมาณพลังงานที่สามารถใช้งานได้
- อัตราการคายประจุ 20C ซึ่งหมายถึงสามารถคายประจุได้เร็วถึง 20 เท่าของความจุแบตเตอรี่ต่อชั่วโมง เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการพลังงานสูงในช่วงเวลาสั้นๆ



ภาพที่ ก-3 แบตเตอรี่โดรนของ Herewin รุ่น Flight Battery Pack

1.5) รีโมทควบคุม: โดรนรุ่น Heavy-lift Quadcopter UAV ใช้รีโมทควบคุมรุ่น Jumper T16 แสดงดังภาพที่ ก-4 เป็นที่นิยมอย่างมากในกลุ่มผู้ควบคุมโดรน ด้วยฟังก์ชันที่ครอบคลุมและประสิทธิภาพสูง อาทิเช่น การตั้งค่าโหมดการบินหรือปรับปุ่มควบคุมต่างๆ นอกจากนี้ Jumper T16

ยังรองรับโปรโตคอลการสื่อสารหลากหลาย ทำให้สามารถควบคุมโดรนหลายรุ่นได้ด้วยรีโมทเดียว ซึ่งรีโมทรุ่นนี้มีคุณสมบัติหลักดังนี้

- หน้าจอแสดงผล: หน้าจอสีขนาดใหญ่ แสดงข้อมูลสำคัญ เช่น ระดับแบตเตอรี่ สถานะการเชื่อมต่อ และการตั้งค่าต่างๆ ของโดรน
- ความถี่ในการควบคุม: รองรับหลายความถี่ในการส่งสัญญาณ ทำให้สามารถควบคุมโดรนที่มีระบบสัญญาณแตกต่างกันได้
- ระบบปุ่มและสวิตช์: มาพร้อมปุ่มควบคุมและสวิตช์หลายตำแหน่ง รวมถึงปุ่มควบคุมแบบคันโยก (joystick) ที่มีความแม่นยำสูงในการควบคุมทิศทาง
- การรองรับหลายโปรโตคอล: รองรับโปรโตคอลการสื่อสารหลายรูปแบบ ช่วยให้สามารถควบคุมโดรนหลายรุ่นได้ด้วยรีโมทเดียว



ภาพที่ ก-4 รีโมทควบคุมโดรน รุ่น Jumper T16



ภาคผนวก ข

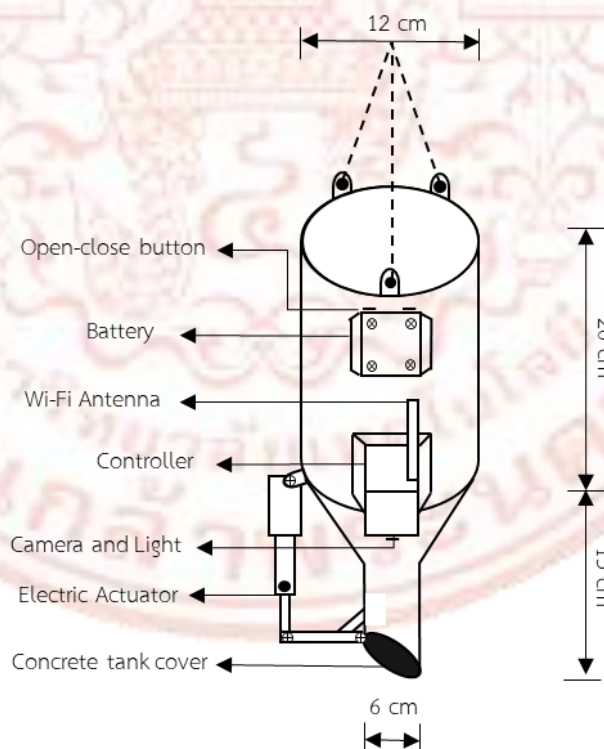
ข้อมูลจำเพาะของถังเทคอนกรีตด้วยโดรน

1. การพัฒนาถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน

1.1) การออกแบบและการคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับประกอบถังเทคอนกรีต

ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้คือการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการเทคอนกรีตด้วยโดรน โดยอุปกรณ์นี้สามารถช่วยให้การเทคอนกรีตในงานก่อสร้างดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ลดระยะเวลาในการทำงาน และลดจำนวนแรงงานที่จำเป็นในการเทคอนกรีต

การประดิษฐ์นี้มีลักษณะเป็นอุปกรณ์ถังเทคอนกรีตด้วยโดรนนี้สามารถควบคุมการทำงานจากระยะไกลผ่านคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือ โดยอาศัยการทำงานร่วมกับโดรน ประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายประการ ได้แก่ ถังเก็บคอนกรีต กล้องควบคุม กระจบบมอเตอร์แกนชัก แบตเตอรี่ เสาสัญญาณ (Wi-Fi) กล้องวิดีโอ และฝาปิดช่องปล่อยคอนกรีต เมื่อส่วนประกอบทั้งหมดถูกประกอบเข้าด้วยกัน อุปกรณ์นี้สามารถเทคอนกรีตด้วยโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้ใช้งานสามารถสั่งการทำงานผ่านเว็บไซต์ที่เชื่อมต่อกับสัญญาณ (Wi-Fi) ของอุปกรณ์ถังเทคอนกรีต เมื่อลงชื่อเข้าใช้ระบบแล้ว ผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานของกระจบบมอเตอร์แกนชักเพื่อเปิดหรือปิดช่องปล่อยคอนกรีตได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังมีกล้องติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามกระบวนการเทคอนกรีตแบบเรียลไทม์ได้ ซึ่งตัวอุปกรณ์ถังเทคอนกรีตด้วยโดรนนั้นแสดงอยู่ในภาพที่ ข-1 และ ข-2



ภาพที่ ข-1 แบบจำลองอุปกรณ์ถังเทคอนกรีตด้วยโดรน



ภาพที่ ข-2 มุมมองของอุปกรณ์ถังเทคอนกรีตด้วยโดรน

สำหรับระบบถังเทคอนกรีตที่ติดตั้งบนโดรน มีการออกแบบ ระบบ Local Service ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต แต่สามารถควบคุมได้ผ่านเครือข่าย (Wi-Fi) ภายในเท่านั้น การสั่งการถังเทคอนกรีตจะสามารถทำได้เฉพาะบุคคลที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย (Wi-Fi) ของระบบนี้ ซึ่งช่วยเสริมความปลอดภัยและป้องกันการสั่งการโดยไม่ได้รับอนุญาตจากภายนอก ระบบนี้ออกแบบมาเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความแม่นยำและความเป็นส่วนตัวสูง

การออกแบบเว็บไซต์สำหรับการควบคุมการเทคอนกรีตด้วยโดรนต้องมีความเรียบง่าย ใช้งานง่าย และสามารถเข้าถึงข้อมูลสำคัญได้อย่างรวดเร็ว โดยผู้ใช้งานจะสามารถควบคุมการทำงานของถังเทคอนกรีตที่ติดตั้งบนโดรนผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย (Wi-Fi) ได้อย่างสะดวก โดยส่วนประกอบของเว็บไซต์ดังต่อไปนี้

- หน้าหลักสำหรับการแสดงผลวิดีโอแบบเรียลไทม์ โดยเว็บไซต์ต้องสามารถรับสัญญาณวิดีโอจากกล้องที่ติดตั้งบนถังเทคอนกรีตได้ ส่วนวิดีโอจากกล้องถูกถ่ายทอดไปยังหน้าจอควบคุมแบบเรียลไทม์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถมองเห็นพื้นที่และสถานการณ์การเทคอนกรีตได้อย่างชัดเจน
- หน้าจอควบคุมการเทคอนกรีต โดยผู้ใช้งานสามารถควบคุมการเปิด-ปิดปากเทคอนกรีตได้ผ่านเว็บไซต์ โดยมีปุ่มสั่งงานที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์แกนชักที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลของคอนกรีต

1.2) ส่วนประกอบของถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน แสดงดังภาพที่ ข-3

- ถังเทคอนกรีตสำหรับโดรนมีน้ำหนักรวมกับอุปกรณ์ควบคุมประมาณ 2.7 กิโลกรัม โดยวัสดุที่ใช้ผลิตคือ Stainless Steel ที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเบา แข็งแรง และทนทานต่อการกัดกร่อน ด้วยพื้นผิวที่เรียบ วัสดุนี้ช่วยให้คอนกรีตไหลได้อย่าง

- ราบรีนและลดโอกาสเกิดการตกค้างในถัง รวมถึงการดูแลรักษาทำได้ง่ายเนื่องจากสามารถทำความสะอาดได้สะดวก
- ปุ่มเปิด-ปิด ของอุปกรณ์ถังเทคอนกรีตด้วยโดรน มีบทบาทสำคัญในการควบคุมระบบ โดยมีหน้าที่หลักในการเปิด-ปิดการทำงานของอุปกรณ์ และควบคุมปากช่องปล่อยคอนกรีตให้เปิดและปิดตามต้องการ นอกจากนี้ยังมีไฟแสดงสถานะสีเขียวที่จะแสดงเมื่ออุปกรณ์พร้อมทำงาน
- เสารับส่งสัญญาณ (Wi-Fi) ถูกติดตั้งเพื่อรับส่งข้อมูลและสัญญาณควบคุมจากระยะไกล ระยะที่ครอบคลุมของการควบคุมระบบสามารถทำได้ในรัศมีประมาณ 20 เมตร
- แบตเตอรี่ในระบบพลังงานที่ขับเคลื่อนอุปกรณ์ทั้งหมดมาจากแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออน (Lithium Ion) ที่มีความจุ 2 แอมป์ ซึ่งสามารถรองรับการทำงานต่อเนื่องได้ระหว่าง 8-10 ชั่วโมงตามเงื่อนไขของการใช้งาน อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ระบบนี้มีการติดตั้งวงจรป้องกันแบตเตอรี่ที่สามารถตัดการทำงานอัตโนมัติเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในระดับต่ำ วงจรนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่ถูกใช้งานจนหมด ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อแบตเตอรี่หรือระบบไฟฟ้าอื่นๆ ในกรณีที่ไม่มีมาตรการทำงานอัตโนมัติ
- กระบอกมอเตอร์แกนชัก โดยตัวแกนชักทำจากอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน และน้ำหนักเบา แกนชักใช้งานกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12V มีประสิทธิภาพในการควบคุมการเคลื่อนไหวยาวแม่นยำ ซึ่งแรงสูงสุดที่แกนชักสามารถรองรับได้คือ 70 นิวตัน และความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนชักสามารถยืดหดได้ที่ความเร็ว 15 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งกระบอกมอเตอร์แกนชักไฟฟ้าออกแบบมาเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดฝาลังคอนกรีต โดยสามารถยืดหดได้ระยะประมาณ 4-5 เซนติเมตร
- กล่องเก็บแผงวงจรของระบบควบคุมนี้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) และการตัดด้วยเลเซอร์ (Laser Cut) เพื่อให้มีความแข็งแรง ทนทาน และเบา พร้อมทั้งช่วยป้องกันแผงวงจรจากความเสียหายที่เกิดจากการกระแทกหรือสภาพแวดล้อมภายนอกที่ไม่พึงประสงค์
- กล่องควบคุมแผงวงจร ที่ใช้สำหรับการทำงานทั้งหมดของอุปกรณ์ ตั้งแต่การเปิด-ปิดฝาลัง ไปจนถึงการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างโดรนกับผู้ควบคุม โดยถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติทนน้ำได้ในระดับที่สามารถรับมือกับละอองน้ำได้

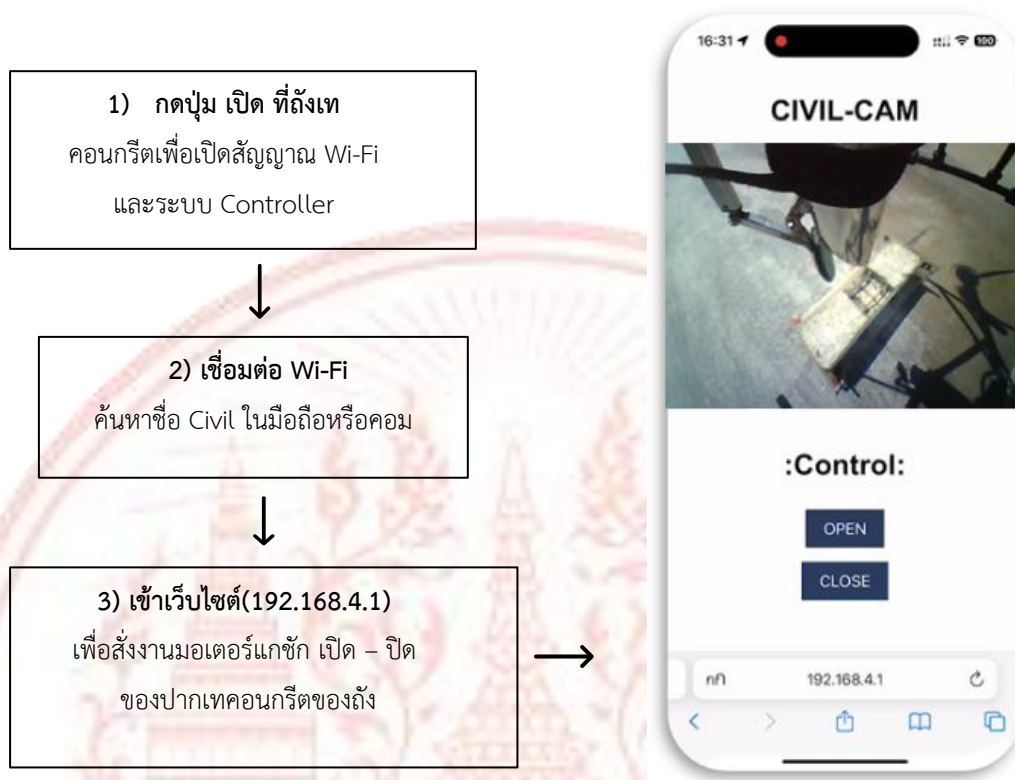
- กล้อง โดยถังเทคอนกรีตได้ติดตั้งกล้องวิดีโอสำหรับการแสดงภาพแบบเรียลไทม์ ผู้ควบคุมสามารถมองเห็นกระบวนการเทคอนกรีตจากระยะไกลผ่านภาพที่ถ่ายโอนมาจากกล้อง ระบบนี้ยังติดตั้งไฟส่องสว่างเพื่อช่วยในการมองเห็นในสภาพแวดล้อมที่มีแสงน้อย
- ฝาปิดช่องปล่อยคอนกรีตจากถังทำจาก Stainless Steel ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีความทนทานและความแข็งแรงในการใช้งาน โดยฝานี้ถูกยึดติดตั้งเข้ากับกระบอกมอเตอร์แกนชัก นอกจากนี้ยังมีแปะแผ่นยางด้านในของฝา เพื่อป้องกันไม่ให้คอนกรีตรั่วไหลหรือซึมออกภายนอกในขณะฝาปิด



ภาพที่ ข-3 ส่วนประกอบของถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน

1.3) หลักการทำงานของถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน

ถังเทคอนกรีตถูกออกแบบมาให้รองรับการเชื่อมต่อกับระบบควบคุมผ่าน (Wi-Fi) ที่มีระยะทางในการควบคุมไม่เกิน 20 เมตร และรองรับการสั่งงานได้จากระยะไกลผ่านเว็บไซด์ผ่านคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์ โดยขั้นตอนแรกเพื่อเปิดสัญญาณ (Wi-Fi) และระบบควบคุม (Controller) ที่เชื่อมต่อกับถังเทคอนกรีต ต่อมาค้นหาชื่อเครือข่าย (Wi-Fi) ที่ชื่อว่า "Civil" บนมือถือหรือคอมพิวเตอร์ เพื่อเชื่อมต่อกับถังเทคอนกรีต หลังจากเชื่อมต่อ (Wi-Fi) แล้ว ให้เข้าเว็บไซต์ที่ระบุ (192.168.4.1) แล้วสั่งการควบคุมจะมีปุ่ม "OPEN" และ "CLOSE" เพื่อสั่งงานมอเตอร์ในการเปิดหรือปิดปากเทคอนกรีตของถัง อีกทั้งยังถ่ายทอดสดจากกล้องที่ติดตั้งอยู่บนถังจะแสดงในหน้าเว็บควบคุม เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถดูสถานะของถังและตรวจสอบตำแหน่งการเทคอนกรีตได้แบบเรียลไทม์ แสดงดังภาพที่ ข-4



ภาพที่ ข-4 หลักการทำงานของถังเทคอนกรีตสำหรับโดรน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายวรเมธ จิตประภากร

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง
สำหรับงานเทคอนกรีตโดยอากาศยานไร้คนขับ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ประวัติ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร
เหนือ ปีการศึกษา 2564
ปัจจุบันพักอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 1398/827 ถนนรามคำแหง แขวงสวน
หลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ เบอร์โทรศัพท์ 084-800-7147 อีเมล
armm.woramet@gmail.com

