

การประเมินศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว: กรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The Assessment of Green Infrastructure Performance: Case Study Faculty of
Engineering, Chulalongkorn University



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว: กรณีศึกษา
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โดย	นายพารณ มั่นใจอาจค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนาพล ตันตีสัตยกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนาพล ตันตีสัตยกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ผาริโน)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เปรมฤดี กาญจนปิยะ)

พารณ มั่นใจอาจค์ : การประเมินศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว: กรณีศึกษาคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (The Assessment of Green Infrastructure
Performance: Case Study Faculty of Engineering, Chulalongkorn University) อ.
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อรทัย ชวลาภาฤทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.
ดร. ธนาพล ตันติสัตยกุล, 112 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำฝนใน
พื้นที่เมือง ครอบคลุมโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว 3 ระบบ ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว และ
คอนกรีตพรุน โดยพิจารณาศักยภาพในการลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำ และศักยภาพใน
การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด ลดปริมาณการใช้
น้ำประปา และการช่วยอนุรักษ์พลังงานของมาตรการดังกล่าว โดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่
กรุงเทพมหานครจากกรมอุตุนิยมวิทยา ย้อนหลังเป็นเวลา 10 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 – 2560 และใช้
โปรแกรม Open studio ซึ่งมีฐานข้อมูลของ EnergyPlus รุ่น 8.9.0 ในการจำลองการใช้พลังงานของ
อาคาร รวมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะเวลาดำเนินการ 50 ปี โดยมีคณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นพื้นที่กรณีศึกษา ผลการศึกษาพบว่า ระบบกักเก็บ
น้ำฝน ขนาดความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำและลดปริมาณ
ก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด ในขณะที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิยังเป็นบวกนั่นคือจะได้ผลประโยชน์ทาง
เศรษฐศาสตร์ด้วย จึงควรได้รับพิจารณาทำก่อนเป็นอันดับแรก ส่วนโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวอื่นๆ นั้น
จะต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม สำหรับหลังคาเขียว เป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สามารถลดปริมาณ
น้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำและลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุดแต่ก็มีต้นทุนที่สูงที่สุดเช่นกัน
ขณะที่คอนกรีตพรุน เหมาะกับการใช้ประโยชน์ในการจัดการน้ำฝนแต่ไม่แนะนำสำหรับจุดประสงค์ใน
การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870203721 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: SUSTAINABLE DEVELOPMENT / GREEN INFRASTRUCTURE / RAINWATER HARVESTING / GREEN ROOF / PERMEABLE CONCRETE

PARON MONJAIANG: The Assessment of Green Infrastructure Performance: Case Study Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. THANAPOL TANTISATTAYAKUL, Ph.D., 112 pp.

This research is aimed to study the potential of green infrastructures for rainwater management in urban areas, using the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University as a case study. *Rainwater harvesting, green roof and porous concrete*, in this study, are selected for assessing the amount of drainage water could be reduced as well as the level of greenhouse gases (GHG) emission reduction through the reduction of wastewater generated, the saving of tap water consumption, and the energy conservation. The last 10 years consecutive rainfall data of Bangkok metropolis obtained from the Department of Meteorology was used in this study whereas the Open Studio program with EnergyPlus v.8.9.0 database was used for simulating the building's energy consumption. The findings demonstrated that among the 3 options of green infrastructure, the best option was *rainwater harvesting system* with a capacity of 40 m³ as it helps reduce either the highest amount of drainage water or the GHG emissions and provides a positive benefit in economic aspect throughout the building service life of 50 years. Whilst *Green roof* requires a huge amount of investment cost for contributing the great benefit to environmental performance, and *porous concrete* is suitable option for rainwater management, but it is not recommended for the purpose of GHG emission reduction.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature
		Advisor's Signature
Field of Study:	Environmental Engineering	Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนาพล ตันติสัตยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ์ รัชฎาวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป ผาวิโน รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร และอาจารย์ ดร. เปรมฤดี กาญจนปิยะ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหาต่างๆตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงเพิ่มเติมวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดีและมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณกรมอุตุนิยมหาวิทยาลัย โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง และบริษัทวันซิสเต็ม จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและอนุเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนๆ ที่คอยให้การช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกด้าน ไม่ว่าจะเป็นกำลังใจในการทำงานและความปรารถนาดีที่มอบให้เสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตทางการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของชุมชน	4
2.1.1 พลังงานไฟฟ้า.....	4
2.1.2 การบริหารจัดการน้ำ.....	6
2.1.3 การคมนาคมขนส่ง	7
2.1.4 การจัดการขยะมูลฝอย.....	7
2.1.5 เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร	8
2.2 โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว	9
2.2.1 ที่มาของแนวคิดโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว	9
2.2.2 ระบบกักเก็บน้ำฝน.....	10
2.2.3 หลังกาเขียว.....	12

2.2.4	พื้นที่สีเขียว.....	13
2.2.5	คอนกรีตพูน.....	14
2.2.6	ถนนและตรอกสีเขียว.....	15
2.3	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝน.....	16
2.3.1	การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ.....	16
2.3.2	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำฝน.....	16
2.4	การจัดการน้ำฝน (Stormwater management).....	17
2.4.1	การไหลบ่าของน้ำ.....	17
2.4.2	ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว.....	18
2.4.3	ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว.....	19
2.5	กรณีศึกษาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในต่างประเทศ.....	19
2.5.1	Chicago.....	19
2.5.2	Portland.....	20
2.6	ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	21
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว.....	23
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1	การศึกษาเบื้องต้น.....	31
3.2	การศึกษาคุณภาพของพื้นที่กรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	31
3.3	ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว.....	32
3.3.1	ระบบกักเก็บน้ำฝน.....	32
3.3.2	หลังคาเขียว.....	36
3.3.2.1	การจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว.....	36
3.3.2.2	การประหยัดพลังงานจากหลังคาเขียว.....	39

3.3.3 คอนกรีตพูน	41
3.4 เปรียบเทียบความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของทางเลือกการพัฒนา โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว	43
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย	45
4.1 สถิติปริมาณน้ำฝน	45
4.1.1 ที่มาและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำฝน.....	45
4.1.2 แนวทางการจัดการน้ำฝนเพื่อให้เกิดประโยชน์	46
4.2 กายภาพของพื้นที่กรณีศึกษา.....	46
4.2.1 คัดเลือกพื้นที่ตัวอย่างในคณะวิศวกรรมศาสตร์.....	46
4.3 การนำน้ำฝนกลับมาใช้ใหม่.....	47
4.3.1 ระบบกักเก็บน้ำฝน.....	47
4.3.2 คอนกรีตพูน	53
4.3.2.1 ทางเลือกคอนกรีตพูนแบบมีถังเก็บน้ำฝนใต้ดิน	55
4.4 การจัดการน้ำร่วมกับการอนุรักษ์พลังงาน.....	59
4.4.1 หลังคาเขียว.....	59
4.4.1.1 การจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว.....	59
4.4.1.2 การประหยัดพลังงานจากหลังคาเขียว.....	60
4.4.1.3 ทางเลือกหลังคาเขียวแบบมีถังกักเก็บน้ำฝน.....	68
4.5 เปรียบเทียบต้นทุนและผลประโยชน์จากการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในแต่ละ แนวทาง.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง	79

ภาคผนวก.....	85
ภาคผนวก ก ข้อมูลปริมาณน้ำฝน	86
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณระบบกักเก็บน้ำฝน	99
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณหลังคาเขียว	101
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณคอนกรีตพูน	103
ภาคผนวก จ การจำลองศักยภาพด้านพลังงานของหลังคาเขียว	105
ภาคผนวก ฉ รายการต้นทุนที่ใช้คำนวณทางเศรษฐศาสตร์	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับประเมินโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว	25
ตารางที่ 2.2	ปริมาณการระเหยของน้ำเฉลี่ยของพื้นที่กรุงเทพมหานคร	28
ตารางที่ 3.1	ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้	37
ตารางที่ 4.1	สถิติปริมาณน้ำฝนสะสมรายเดือนในช่วงระยะเวลา 10 ปีย้อนหลัง	45
ตารางที่ 4.2	กายภาพของพื้นที่ตัวอย่าง	46
ตารางที่ 4.3	สรุปการจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว	60
ตารางที่ 4.4	คุณสมบัติของหลังคาอ้างอิง	60
ตารางที่ 4.5	ผลการจำลองสัดส่วนการใช้พลังงานของอาคารวิศวะฯ 100ปี กรณีหลังคาอ้างอิง	60
ตารางที่ 4.6	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืช	61
ตารางที่ 4.7	ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับดิน	61
ตารางที่ 4.8	ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืชที่ใช้ในการจำลองการประหยัดพลังงานของหลังคาเขียว ...	63
ตารางที่ 4.9	ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับดินที่ใช้ในการจำลองการประหยัดพลังงานของหลังคาเขียว ...	63
ตารางที่ 4.10	ผลการจำลองสัดส่วนการใช้พลังงานของอาคารวิศวะฯ 100ปี ที่มีการติดตั้งหลังคาเขียว.....	64
ตารางที่ 4.11	เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการใช้งานจริงและหากมีการติดตั้งหลังคาเขียว	65
ตารางที่ 4.12	มูลค่าปัจจุบันสุทธิและผลประโยชน์ด้านการจัดการน้ำและการลดก๊าซเรือนกระจกของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวต่างๆ ในระยะเวลาโครงการ 50 ปี	71
ตารางที่ ก.1	ตัวอย่างข้อมูลปริมาณฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยา.....	87
ตารางที่ ฉ.1	ต้นทุนระบบกักเก็บน้ำฝน	110
ตารางที่ ฉ.2	ต้นทุนคอนกรีตพูน.....	110
ตารางที่ ฉ.3	ต้นทุนถังเก็บน้ำใต้ดิน	111
ตารางที่ ฉ.4	ต้นทุนหลังคาเขียว	111

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 ระบบกักเก็บน้ำฝนประเภทจ่ายน้ำฝนด้วยปั๊มทางอ้อม	11
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหลังคาเขียว.....	12
รูปที่ 2.3 หลังคาเขียวใน Lancaster, Pennsylvania, USA.	13
รูปที่ 2.4 สวนน้ำฝน	14
รูปที่ 2.5 ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม	14
รูปที่ 2.6 ระบบการจัดการน้ำแบบอนุรักษ์นิยม	18
รูปที่ 2.7 ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว.....	19
รูปที่ 2.8 หลังคาเขียวของอาคารศาลาว่าการของเมือง Chicago	20
รูปที่ 2.9 แผนที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร.....	21
รูปที่ 2.10 แผนผังพื้นที่เขตจัดการผลประโยชน์บริเวณเขตปทุมวัน	22
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
รูปที่ 3.2 แนวทางการคำนวณอัตราการใช้น้ำประปาที่ลดได้.....	33
รูปที่ 3.3 แนวทางการคำนวณปริมาณน้ำเสียที่ลดได้จากระบบกักเก็บน้ำฝน	34
รูปที่ 3.4 แนวทางการคำนวณการจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว.....	36
รูปที่ 3.5 แนวทางการประเมินการอนุรักษ์พลังงานจากหลังคาเขียว.....	39
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งที่ตั้งพื้นที่ตัวอย่าง.....	47
รูปที่ 4.2 ปริมาณฝนเฉลี่ยและความต้องการน้ำรายเดือนของอาคารวิศวะฯ 100ปี.....	48
รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำประปาที่ลดได้เมื่อใช้ถังเก็บน้ำฝนความจุต่างๆ.....	48
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของฝนในพื้นที่กรณีศึกษา.....	49
รูปที่ 4.5 ต้นทุนของระบบกักเก็บน้ำฝนและมูลค่าของน้ำประปาที่ลดได้ในเวลา 50 ปี	50
รูปที่ 4.6 มูลค่าปัจจุบันสุทธิกับปริมาณน้ำประปาที่ลดได้สัมพันธ์กับความจุขนาดต่างๆ.....	51
รูปที่ 4.7 มูลค่าปัจจุบันสุทธิกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้สัมพันธ์กับความจุขนาดต่างๆ	52

รูปที่ 4.8 ความจุที่ทำให้ลดปริมาณน้ำประปาได้สูงสุดโดยที่ NPV ยังเป็นบวกสัมพันธ์กับความ ต้องการน้ำและขนาดพื้นที่หลังคารับน้ำของอาคาร.....	52
รูปที่ 4.9 IDF curve ของพื้นที่กรุงเทพมหานคร	53
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนที่ระบายได้กับพื้นที่คอนกรีตพูนในเวลา 50 ปี	54
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้กับพื้นที่คอนกรีตพูนในเวลา 50 ปี ...	54
รูปที่ 4.12 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนพื้นที่ขนาดต่างๆ ในเวลา 50 ปี.....	55
รูปที่ 4.13 รูปตัดขวางแสดงชั้นการปูคอนกรีตพูน	55
รูปที่ 4.14 ปริมาณน้ำประปาที่ลดได้จากการติดตั้งคอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำฝน	56
รูปที่ 4.15 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการติดตั้งคอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำฝน ...	57
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าน้ำประปาที่ลดได้ในเวลา 50 ปี กับขนาดความจุถังเก็บน้ำของ ลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร	57
รูปที่ 4.17 ต้นทุนของลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี ที่ความจุขนาดต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของมูลค่าปัจจุบันสุทธิกับขนาดพื้นที่ลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนมี ระบบกักเก็บน้ำขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี ที่ความจุขนาดต่างๆ	58
รูปที่ 4.19 ส่วนประกอบหลังคาเขียว.....	59
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความสำคัญของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืชต่อการใช้พลังงานภายในอาคาร ...	62
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศกับค่า LAI	63
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาเปรียบเทียบกรณีหลังคาอ้างอิงและหลังคาเขียว	66
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนเปรียบเทียบหลังคาเขียวกับหลังคาอ้างอิงใน 1 วัน	67
รูปที่ 4.24 ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวในเวลา 50 ปี.....	68
รูปที่ 4.25 ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้จากหลังคาเขียวที่แบบมีถังเก็บน้ำในเวลา 50 ปี.....	69
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำประปาที่ต้องใช้รดน้ำหลังคาเขียวในเวลา 50 ปีกับความจุ ถังเก็บน้ำ.....	69

รูปที่ 4.27 ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำที่ความจุ ต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของมูลค่าปัจจุบันสุทธิกับความจุถังเก็บน้ำขนาดต่างๆ.....	70
รูปที่ 4.29 ต้นทุนหน่วยสุดท้ายต่อปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บหรือระบายได้ของทางเลือกโครงสร้าง พื้นฐานต่างๆ	72
รูปที่ 4.30 ต้นทุนหน่วยสุดท้ายต่อการลดก๊าซเรือนกระจกของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว ต่างๆ.....	73
รูป จ.1 การไหลของการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม OpenStudio.....	106
รูปที่ จ.2 แบบจำลองสมดุลพลังงานของหลังคาเขียว.....	107



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

องค์การสหประชาชาติ (United Nations) ได้มีการคาดการณ์ว่าภายในปีค.ศ.2050 ประชากรโลกร้อยละ 66 จะใช้ชีวิตอยู่ในพื้นที่เมือง (United Nations, 2014) ซึ่งพื้นที่ในเมืองเป็นพื้นที่ที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น มีกิจกรรม มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำ ดิน อากาศ อย่างหนาแน่น ทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบของการใช้ทรัพยากรที่นับวันจะทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น รวมทั้งการขยายตัวของชุมชนเมืองอย่างรวดเร็ว ก่อให้เกิดการสูญเสียพื้นที่สีเขียว มลพิษที่แพร่กระจายทั้งบนผิวดิน พื้นน้ำ และในอากาศ ขาดแคลนแหล่งน้ำดื่ม อีกทั้งยังมีการสร้างเงื่อนไขที่ไม่เอื้ออำนวยกับการจัดการน้ำ เช่น การก่อสร้างปิดทางน้ำ ปัญหาการกักเก็บน้ำ การระบายน้ำ ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปรากฏการณ์เกาะความร้อนที่เพิ่มขึ้นในเมือง ดังนั้นจึงเป็นความท้าทายที่เมืองจะจัดการกับปัญหาต่างๆ ได้อย่างยั่งยืน (OECD, 2012)

สำหรับกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นเมืองหลวงและเป็นนครที่มีประชากรมากที่สุดของประเทศ ไทย และเมื่อพิจารณาสถิติจำนวนประชากร พบว่ามีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่ พ.ศ.2554 (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2558) ดังนั้นเพื่อเป็นการรองรับการเติบโตของเมือง จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของเมืองในด้านต่างๆ อาทิเช่น ระบบพลังงานไฟฟ้า ระบบการบริหารจัดการน้ำ ระบบการคมนาคมและขนส่ง ระบบการจัดการขยะมูลฝอย และระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (โครงสร้างพื้นฐานสีเทา หรือ Gray Infrastructure) นอกจากนี้ การพัฒนาดังกล่าวต้องเป็นการพัฒนาที่ควบคู่ไปกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานตามหลักการหรือแนวคิด “โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว (Green Infrastructure)” ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวเป็นอีกหนึ่งแนวคิดที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมา โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวจะหมายถึง พื้นที่สีเขียวที่มีอาณาเขตเชื่อมโยงถึงกัน โดยสามารถพบได้ทั้งในเขตและรอบเขต ภูมิทัศน์ของเมือง (Mell, I.C., 2008) หรือเรียกว่าเป็นระบบพื้นที่สีเขียวของเมือง (Tzoulas, K. และคณะ, 2007) และนอกจากข้อดีอันหลากหลายของโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวทั้งทางด้านนิเวศวิทยา เศรษฐศาสตร์และด้านสังคมแล้ว โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวยังช่วยให้นักวางผังเมืองสามารถพัฒนาสถานที่ที่มีความหลากหลายและยั่งยืนทางด้านนวัตกรรม (Mell, I.C., 2008) ส่งเสริมระบบนิเวศ สุขภาพ ความเป็นอยู่ที่ดีของมนุษย์ (Tzoulas, K. และคณะ, 2007) และยังมีบทบาทสำคัญต่อการ

ปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ สำหรับตัวอย่างการดำเนินงานด้านโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว เช่น การสร้างสวนสาธารณะ ป่าในเมือง ต้นไม้ริมทางสัญจร หลังคาเขียว ถนนและตรอกสีเขียว ระบบกักเก็บน้ำฝน สวนน้ำฝน และสวนหย่อม เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาศักยภาพการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำฝนในพื้นที่เมือง ได้แก่ หลังคาเขียว ระบบกักเก็บน้ำฝน และคอนกรีตพรุน โดยพิจารณาปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงต่อระบายน้ำที่ลดลงและปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงได้จากมาตรการดังกล่าว รวมทั้งเสนอแนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่มีความเหมาะสมของชุมชนเมือง โดยมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นพื้นที่กรณีศึกษา

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อประเมินศักยภาพการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สนใจ ได้แก่ การใช้หลังคาเขียว ระบบกักเก็บน้ำฝน และคอนกรีตพรุนในการลดปริมาณน้ำฝนที่ลงสู่ท่อระบายน้ำและการประหยัดพลังงานของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงได้จากการประยุกต์ใช้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในข้อ 1
- 3) วิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่ศึกษา

1.3 ขอบเขตทางการศึกษา

- 1) พื้นที่กรณีศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2) การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวจะพิจารณาทางเลือกการจัดการน้ำ ได้แก่
 - ระบบกักเก็บน้ำฝน
 - หลังคาเขียว
 - คอนกรีตพรุน
- 3) ประเมินปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำที่ลดลงจากปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่และประสิทธิภาพการลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำของทางเลือกการจัดการน้ำต่างๆ
- 4) ประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงจากปริมาณไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการบำบัดน้ำเสียและการผลิตน้ำประปาที่ลดลง
- 5) การประหยัดพลังงานจากการประยุกต์ใช้หลังคาเขียว

6) ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) ที่ใช้ในการคำนวณอ้างอิงจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก องค์การมหาชน (อบก.)

7) ประเมินความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์โดยอาศัยหลักการการคำนวณต้นทุนหน่วยสุดท้าย (Abatement cost)

8) ในการคำนวณมีข้อจำกัดคือไม่รวมระบบท่อลำเลียงและระบบปั๊ม

9) เสนอแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่เหมาะสมโดยอาศัยข้อมูลที่ได้รับจากการศึกษาลักษณะและศักยภาพในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว รวมถึงประสบการณ์ในการพัฒนาจากเมืองอื่นๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แนวทางการจัดการน้ำและการลดก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมสำหรับอาคาร
- 2) แนวทางการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวบนพื้นฐานของความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์สำหรับชุมชนเมืองของประเทศไทย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างพื้นฐานของชุมชน

โครงสร้างพื้นฐานของชุมชน (Community infrastructure) หรือ (Gray Infrastructure) หมายถึงสิ่งอำนวยความสะดวกและบริการพื้นฐานของชุมชน รวมถึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเติบโตทางเศรษฐกิจ เช่น ระบบการผลิตและกระจายพลังงาน การบริหารจัดการน้ำ การคมนาคมขนส่ง การจัดการขยะมูลฝอย และเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร เป็นต้น

2.1.1 พลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของชุมชน เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการผลิตอุตสาหกรรม สิ่งอำนวยความสะดวกในเคหสถานและการดำรงชีวิตประจำวัน ระบบการไฟฟ้าทั่วไปประกอบด้วย

1) โรงผลิตกระแสไฟฟ้า มีกระบวนการผลิตจากหลายแหล่งพลังงาน ได้แก่

- โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน (Thermal Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ น้ำมันเตา หรือถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า อาศัยความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไปต้มน้ำให้เป็นไอน้ำที่มีแรงดันและอุณหภูมิสูง เพื่อไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ ซึ่งจะมีเพลลาต่อเชื่อมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นไอน้ำจะผ่านไปกลั่นตัวเป็นน้ำที่เครื่องควบแน่น และถูกส่งกลับมารับความร้อนในหม้อน้ำ (Boiler) อีกครั้ง

- โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-Cycle Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีการทำงาน 2 ระบบร่วมกัน คือ ระบบของโรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ ทำงานร่วมกับระบบของโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ โดยนำเชื้อเพลิงมาจุดระเบิดเพื่อให้เกิดพลังงานความร้อนไปขับเคลื่อนกังหันก๊าซในการผลิตไฟฟ้า จากนั้นไอเสียที่เกิดจากการจุดระเบิดในเครื่องกังหันก๊าซ จะไปผ่านหม้อน้ำ เพื่อต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

- โรงไฟฟ้ากังหันแก๊ส (Gas Turbine Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงโดยทำการอัดอากาศให้มีความดันสูง 8-10 เท่า และส่งอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ ทำให้เกิดการขยายตัว เกิดแรงดัน และอุณหภูมิสูง ส่งอากาศเข้าไปในหมุนเครื่องกังหันแก๊ส เพลลาของเครื่องกังหันแก๊สจะต่อกับเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและได้กระแสไฟฟ้า

- โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนประเภทหนึ่ง อาศัยพลังความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการแตกตัวของธาตุยูเรเนียม แล้วนำไปใช้ในกระบวนการผลิตไอน้ำที่ใช้ในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- โรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เศษวัสดุจากเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร กากจากผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านการแปรรูปแล้ว เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง ชังข้าวโพด กากและกะลามะพร้าว สาเหล้ม เป็นต้น นำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และพลังไอน้ำ ซึ่งอาจเป็นเศษวัสดุชนิดเดียว หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ โดยชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป สำหรับโรงไฟฟ้าที่เลือกใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากแกลบมีความชื้นต่ำ จึงให้ค่าความร้อนสูง และมีหลักการการทำงานคล้ายกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน

- โรงไฟฟ้าพลังงานขยะ (Incineration Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดยขยะส่วนใหญ่เป็นมูลชีวภาพ เช่น กระจาดข เศษอาหาร และไม้ ฯลฯ โรงไฟฟ้าพลังงานขยะมีวิธีการทำงานเหมือนกับโรงไฟฟ้าอื่นๆ โดยจะนำขยะมาเผาบนตะแกรง แล้วนำความร้อนที่เกิดขึ้นมาใช้ต้มน้ำในหม้อน้ำจนกลายเป็นไอน้ำเดือด ซึ่งจะไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้แรงดันน้ำจากเขื่อน และอ่างเก็บน้ำ ซึ่งอยู่ในระดับสูงกว่าโรงไฟฟ้าไปหมุนเพลลาของกังหันน้ำ ซึ่งจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าตลอดเวลาที่มีการเปิดให้น้ำไหลผ่าน

- โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้ความร้อนของแสงอาทิตย์ไปต้มน้ำ หรือทำให้ก๊าซร้อน แล้ว ใช้ไอน้ำร้อนหรือก๊าซร้อนไปทำให้กังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนอีกต่อหนึ่ง หรืออาจใช้เซลล์สุริยะ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar Cell) ในปริมาณมากเป็นตัวนำความร้อน ซึ่งการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีค่อนข้างสูง มีความสลับซับซ้อน และราคาลงทุนขั้นแรกสูงมาก

- โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plant) เป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้กังหันลมเป็นอุปกรณ์นำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า จึงต้องติดตั้งกังหันลมไว้ในสถานที่ที่มีลมพัดแรงตลอดเวลาจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อกังหันลมหมุนแกนของกังหันลมที่ต่อมายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตไฟฟ้าออกมาใช้งานได้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นระบบส่งผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงจากแหล่งผลิตไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย

- 2) สายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นระบบส่งผ่านกระแสไฟฟ้าแรงสูงจากแหล่งผลิตไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย
- 3) สถานีไฟฟ้าย่อย เป็นสถานียลดแรงดันไฟฟ้าลงให้เหมาะสมกับการใช้งาน ก่อนแจกจ่ายส่งผู้ให้บริการ
- 4) สายส่งกระแสไฟฟ้า เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อให้บริการแก่ประชาชนตามอาคารบ้านเรือนต่างๆ

2.1.2 การบริหารจัดการน้ำ

การประปา เป็นการจัดหาและทำให้มีน้ำสะอาด สำหรับการอุปโภคบริโภคในชุมชนให้มีปริมาณน้ำเพียงพอทั่วถึง ทั้งในครัวเรือนและเพื่อกิจการต่างๆ ในชุมชน ระบบการประปามีขั้นตอนที่สำคัญ 4 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การจัดหาแหล่งน้ำดิบ แหล่งน้ำดิบสำหรับจัดทำประปาควรอยู่ใกล้ชุมชน แหล่งน้ำที่ดีจะต้องมีปริมาณน้ำเพียงพอกับความต้องการใช้อย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องตลอดปี คุณภาพดี ไม่มีของเสียเจือปนจนยากแก่การบำบัด

- 2) การทำน้ำดิบให้เป็นน้ำสะอาด น้ำดิบเป็นน้ำที่มีสารแขวนลอยปนเปื้อน จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดของเสียและสิ่งปนเปื้อนให้เป็นน้ำสะอาดโดยระบบบำบัดหรือโรงกรองน้ำ เพื่อให้สารละลายและสิ่งเจือปนในน้ำ เช่น สี ความขุ่น ความกระด้างของแร่ธาตุ ฯลฯ ถูกกำจัดให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด

- 3) การลำเลียงน้ำ การลำเลียงน้ำจากแหล่งน้ำดิบมายังจุดผลิตเพื่อทำให้เป็นน้ำสะอาด และนำน้ำสะอาดที่ผ่านการบำบัดแล้วจัดส่งไปยังผู้ให้บริการ อาจใช้ท่อลำเลียงชนิดต่างๆ เช่น คลองส่งน้ำ ท่อน้ำ ท่ออุโมงค์ เป็นต้น การเลือกชนิดและประเภทท่อลำเลียงต้องเหมาะสมกับภูมิประเทศและระยะทางที่ต้องการส่งน้ำให้ได้ปริมาณที่ต้องการ

- 4) การแจกจ่ายน้ำ การนำน้ำเข้าสู่ชุมชนหรือแจกจ่ายน้ำสู่ผู้ใช้น้ำ ต้องจัดให้มีปริมาณน้ำ ความดัน และความเร็วของน้ำที่พอเหมาะับลักษณะการใช้ วิธีที่สะดวกที่สุดคือต่อท่อจากโรงกรองน้ำหรือจุดจ่ายน้ำหลักไปตามแนวถนน เพื่อแจกจ่ายสู่อาคารบ้านเรือนสองฟากฝั่ง

การบำบัดน้ำเสีย เป็นการนำน้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์จากชุมชนตามกิจกรรมต่างๆ ทั้งการอยู่อาศัย พาณิชยกรรม อุตสาหกรรม เกษตรกรรม จะเป็นน้ำเสีย มีสารพิษเจือปน หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำผิวดินหรือบนพื้นดิน จะทำให้ไหลปนเปื้อนกับแหล่งน้ำหรือตกค้างในเนื้อดิน ทำความเสียหายแก่ระบบนิเวศ

ระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นการทำให้ของเสียต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำ ทั้งส่วนที่เป็นของเหลว ของแข็ง แยกตัวออกจากน้ำกลายเป็นตะกอนจากการบำบัด ซึ่งจะต้องทำให้อยู่ตัวสำหรับการกำจัดต่อไป ระบบการบำบัดน้ำเสียจึงรวมถึงการบำบัดตะกอนด้วย

การบำบัดน้ำเสียอาจใช้กระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และกระบวนการทางชีวภาพ การเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในน้ำเสีย ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และการควบคุมดูแลระบบ น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนตามกระบวนการแล้วจะเป็นน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐาน สามารถระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหรือนำกลับไปใช้ทางเกษตรกรรมได้ ส่วนตะกอนของแข็งที่แยกออกจากน้ำเสีย เป็นของเสียที่ต้องนำไปบำบัดจนได้สภาพที่ไม่ย่อยสลาย ก่อนนำไปกำจัดในขั้นสุดท้ายต่อไป

2.1.3 การคมนาคมขนส่ง

การคมนาคม หมายถึง การเคลื่อนที่ติดต่อกัน เช่น ถนน ทางน้ำ ทางรถไฟ เป็นต้น การคมนาคมเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ไปมาหาสู่ระหว่างคนในพื้นที่ส่วนต่างๆ ของเมือง

การขนส่ง หมายถึง การเคลื่อนที่ของยานพาหนะเพื่อนำคน สินค้า หรือวัสดุสิ่งของ สู่จุดหมายปลายทาง การขนส่งอาจทำได้ทั้งทางบก ทางน้ำ และทางอากาศ การขนส่งจึงเป็นการเคลื่อนที่ของคนและสิ่งของจากสถานที่แห่งหนึ่งไปยังอีกแห่งหนึ่งในพื้นที่ส่วนต่างๆ ของเมือง

การคมนาคมและขนส่งทางบกภายในพื้นที่เมืองแบ่งได้ 2 ประเภท คือระบบล้อบนราง และระบบล้อบนถนน

ระบบล้อบนราง เส้นทางเป็นเส้นตรง การหยุดและจอดรถเป็นไปตามระยะทางที่กำหนด สามารถเคลื่อนที่ได้ไกลในระยะเวลาและความเร็วที่แน่นอน ระบบล้อบนรางจึงเหมาะกับเมืองขนาดใหญ่ที่มีประชากรมากกว่า 1 ล้านคนขึ้นไป พาหนะสำหรับระบบล้อบนราง เช่น รถไฟฟ้าบนดิน รถไฟฟ้าใต้ดิน หรือรถไฟฟ้าบนรางที่ยกระดับเหนือพื้นดิน เป็นต้น

ระบบล้อบนถนน เหมาะกับเมืองขนาดกลางและขนาดเล็กทั่วไป สามารถเคลื่อนที่ลัดเลี้ยว และหยุดจอดได้ทุกระยะตามเส้นทางที่ต้องการ จึงทำให้อาคารสิ่งก่อสร้างขยายตัวได้ตลอดสองข้างทาง พาหนะสำหรับล้อบนถนน เช่น รถโดยสารประจำทาง รถบรรทุก รถยนต์ รถจักรยานยนต์ รถจักรยาน เป็นต้น

2.1.4 การจัดการขยะมูลฝอย

การจัดการขยะมูลฝอย ประกอบด้วย การรวบรวมจัดเก็บและการนำไปกำจัด การจัดการขยะมูลฝอยเป็นเรื่องเกี่ยวกับการจัดหาสถานที่ การเลือกวิธีการรวบรวมจัดเก็บและการนำไปกำจัดซึ่งมีความสัมพันธ์กับจำนวนประชากรและการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นแหล่งมูลฝอยแต่ละประเภท

ชนิดของขยะมูลฝอย โดยทั่วไป มี 3 ชนิด คือ ขยะมูลฝอยจากชุมชน ขยะมูลฝอยจากอุตสาหกรรม และขยะมูลฝอยที่มีอันตรายสูง ขยะมูลฝอยทั้งหมดจำแนกเป็น ขยะเปียก ขยะแห้ง ขี้เถ้า เศษสิ่งก่อสร้าง ซากสัตว์ พลาสติก ไม้ ขยะทุกประเภทจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะมูลฝอยจากการกิจกรรมและขยะพิเศษ เช่น ขยะจากโรงพยาบาล เป็นต้น

วิธีการกำจัดขยะมูลฝอยนิยมใช้ มี 3 วิธี คือ

1. วิธีฝังกลบตามหลักการสุขาภิบาล เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เหมาะกับขยะทุกประเภท ยกเว้นขยะติดเชื้อหรือสารพิษซึ่งต้องแยกไปกำจัดต่างหาก การใช้วิธีฝังกลบต้องใช้พื้นที่ที่กว้างมาก ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ ผลพลอยได้จากการฝังกลบทำให้ได้พื้นที่เพิ่มขึ้น
2. วิธีหมักทำปุ๋ย เหมาะกับมูลฝอยย่อยสลายง่าย เช่น เศษอาหาร กิ่งไม้ ไม้ เป็นต้น ดังนั้นก่อนนำขยะไปทำปุ๋ยต้องทำการคัดแยกพวกโลหะออกจากการหมัก ส่วนที่เหลือต้องนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ หรือกำจัดด้วยวิธีอื่น

วิธีเผาในเตาเผาเป็นวิธีที่ดีที่สุด เพราะเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ เหมาะกับขยะติดเชื้อ ขยะที่มีความชื้นต่ำ แต่เป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้ความรู้ความชำนาญ ของเหลือคือเถ้าจากการเผาไหม้ต้องนำไปกำจัดต่อ

2.1.5 เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

โครงสร้างพื้นฐานดิจิทัลที่สำคัญ ประกอบด้วย โครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ โทรคมนาคม และการแพร่ภาพกระจายเสียง ที่มีความทันสมัย มีคุณภาพ ขนาดเพียงพอครอบคลุมทุกพื้นที่ และสามารถให้บริการอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับการติดต่อสื่อสาร การเชื่อมต่อ การแลกเปลี่ยนข้อมูลสารสนเทศ การค้าและพาณิชย์ การบริการภาครัฐและเอกชน ตลอดจนการใช้งานในรูปแบบต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจและความมั่นคงทางสังคม

2.2 โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

2.2.1 ที่มาของแนวคิดโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

ความต้องการในการพัฒนาที่ดินและความเสื่อมโทรมของพื้นที่ธรรมชาติในประเทศสหรัฐอเมริกาที่เพิ่มขึ้น ทำให้นักวางแผนด้านการอนุรักษ์และการใช้ประโยชน์ที่ดินต้องหามาตรการหรือกลยุทธ์ที่จะทำให้การพัฒนาและการอนุรักษ์มีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับความต้องการของระบบของธรรมชาติในเมืองที่สามารถรองรับได้ หน่วยงานด้านการอนุรักษ์และวางแผนได้รับความกดดันอย่างมากที่จะต้องสร้างมาตรการเหล่านี้เพื่อผลทางเศรษฐกิจและในขณะเดียวกันก็ต้องรักษาพื้นที่ที่มีความสำคัญทางธรรมชาติเอาไว้ด้วย จากงานวิจัยหลายชิ้นได้บ่งชี้ให้เห็นว่าการเสื่อมโทรมหรือการสูญเสียซึ่งประโยชน์ใช้สอยทางธรรมชาตินั้นมิได้เกิดขึ้นเพียงเพราะการพัฒนาโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์เท่านั้น แต่ยังเป็นผลมาจากความบกพร่องในการพยายามอนุรักษ์โดยขาดการพิจารณาถึงส่วนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอย่างรอบด้านอีกด้วย (Noss, R.F., 1987, Beatley, T., 2000)

ทั้งนี้คำว่า “โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว (Green Infrastructure)” มีขึ้นครั้งแรกในปีค.ศ. 1994 ในรายงานของหน่วยงานรัฐบาลของฟลอริดา เกี่ยวกับกลยุทธ์ในการอนุรักษ์ที่ดิน แสดงถึงการให้ความสำคัญกับระบบธรรมชาติอย่างเท่าเทียมกับการสร้างโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมทั่วไป โดยมีฐานคิดว่าเมื่อให้ความสำคัญกับการวางแผนโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรม (Gray Infrastructure) เช่น งานระบบถนน ไฟฟ้า ประปา โทรศัพท ฯลฯ ก็ควรที่จะต้องให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์และฟื้นฟูระบบนิเวศธรรมชาติ (Green Infrastructure) ด้วยอย่างเท่าเทียมกันเพื่อลดผลเสียหายทางธรรมชาติจากการพัฒนาดังที่หลายเมืองของอเมริกาได้ประสบอยู่ แนวคิดเช่นนี้มุ่งหมายเพื่อส่งเสริมให้ประชาชนตระหนักถึงความสำคัญของการอนุรักษ์และฟื้นฟูระบบธรรมชาติในกระบวนการวางแผนและออกแบบ (Boonyanusith, N. และคณะ, 2015)

โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว มีผู้ให้คำจำกัดความไว้หลากหลายประเด็น อาทิเช่น Benedict, M.A. และ McMahon, E.T. (2006) ให้คำจำกัดความไว้ว่าโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวคือเครือข่ายที่เชื่อมโยงของพื้นที่สีเขียวเพื่อการอนุรักษ์คุณค่าและประโยชน์ใช้สอยของระบบนิเวศที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ หรือที่ Davis, A.Y. และคณะ (2012) ได้ให้คำจำกัดความของโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวไว้ว่า คือองค์ประกอบหนึ่งของเขตเมืองที่มีการผสมผสานกันของต้นไม้ริมถนน สวนสาธารณะ พื้นที่เพื่อการพักผ่อน พื้นที่ชุ่มน้ำ ทะเลสาบ และลำธาร ซึ่งคำจำกัดความนี้ไปสอดคล้องกับความหมายของคำว่า พื้นที่ป่าในเมือง (Urban Forest) ที่หมายถึง ต้นไม้ใหญ่ ป่าไม้ พื้นที่สีเขียวและส่วนที่เกี่ยวข้องทั้งสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต รวมไปถึงองค์ประกอบทางวัฒนธรรมทั้งที่มีอยู่ในพื้นที่และโดยรอบพื้นที่เมือง

(Carter, J., 1995) ดังนั้นแล้วถือได้ว่าคำทั้งสองนี้มีความหมายที่สื่อไปถึงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน ด้านสิ่งแวดล้อมของพื้นที่เมือง โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวนั้นได้รับการยอมรับโดยทั่วไปว่ามีส่วนเพิ่มศักยภาพด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และเศรษฐกิจให้กับชุมชนและยังสิ้นเปลืองค่าบำรุงรักษาน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างพื้นฐานทั่วไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวนี้เป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ช่วยให้เกิดความยั่งยืนของพื้นที่เมืองและชุมชน

ในอดีตโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวหมายถึงสวน ป่าไม้ พื้นที่ชุ่มน้ำ แนวต้นไม้ หรือทางน้ำผ่าน ที่อยู่ในพื้นที่และโดยรอบพื้นที่เมือง (McMahon, E., 2000) ปัจจุบันโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวมักจะมี ความหมายเกี่ยวข้องกับ การนำวิถีทางธรรมชาติมาใช้ในการพัฒนาเมืองเพื่อบรรลุเป้าหมายด้าน สิ่งแวดล้อมและเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน ตัวอย่างเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว ทางเท้าที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ ถนนสีเขียว ป่าในเมือง และพื้นที่เปิด โล่งสีเขียวเช่น สวนสาธารณะและพื้นที่ชุ่มน้ำ เป็นต้น

2.2.2 ระบบกักเก็บน้ำฝน

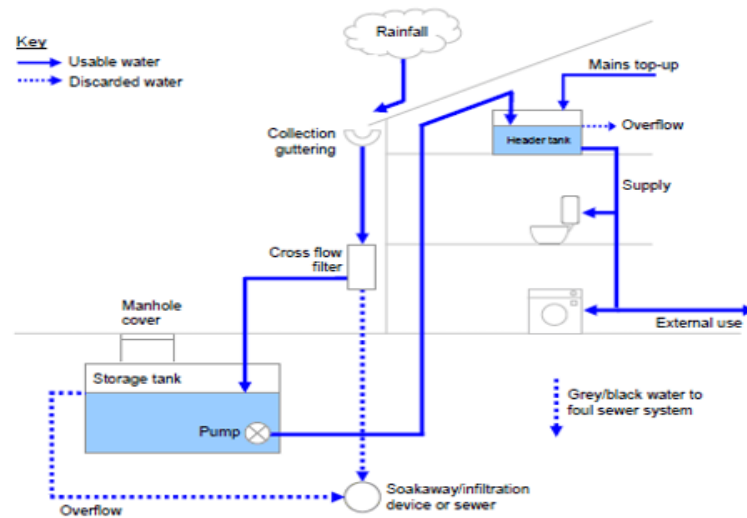
ระบบกักเก็บน้ำฝน (Rainwater harvesting system) เป็นระบบที่รวบรวมและกักเก็บน้ำฝน ที่ไหลบ่าจากหลังคาอาคาร เพื่อนำน้ำฝนมาใช้ประโยชน์ในการอุปโภคแทนการใช้น้ำประปา การกัก เก็บน้ำฝนเป็นวิธีที่ใช้กันมานานแล้วซึ่งมีตั้งแต่การเก็บน้ำฝนใส่ถังขนาดเล็กบนพื้นดินไปจนถึงระบบกัก เก็บน้ำฝนขนาดใหญ่ใต้ดิน นอกจากนี้จะเป็นการลดการใช้พลังงานและงบประมาณของรัฐแล้ว ยังเป็น การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง เนื่องจากในบริเวณที่มีการก่อสร้างอย่างหนาแน่น พื้นที่ ของดินที่จะซึมซับน้ำลงใต้ดินมีอย่างจำกัดเพราะผิวดินถูกแทนที่ด้วยอาคารและพื้นคอนกรีต ดังนั้น เมื่อเวลาที่ฝนตกจะทำให้เกิดน้ำผิวดินปริมาณมากที่ไม่สามารถซึมลงดินได้ จึงทำให้เกิดน้ำฝนไหลบ่า ชะล้างและเกิดการพังทลายของหน้าดิน ดังนั้นถ้าในแต่ละอาคารมีระบบกักเก็บน้ำฝนเพื่อนำน้ำฝนไป ใช้ประโยชน์ จำนวนน้ำฝนที่ไหลบ่าและปริมาณน้ำเสียที่ต้องไปบำบัดที่โรงบำบัดน้ำเสียก็จะลดน้อยลง เป็นการประหยัดพลังงานได้อีกทางหนึ่งด้วย

องค์ประกอบสำคัญของระบบกักเก็บน้ำฝนแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ พื้นผิวรองรับน้ำฝน ระบบลำเลียงน้ำฝน ตัวกรอง ถังเก็บน้ำฝน เครื่องสูบน้ำ โดยพื้นผิวรองรับน้ำฝนจะเป็นตัวกำหนด ปริมาณน้ำฝนที่สามารถเก็บได้และทำให้ทราบถึงขนาดของถังเก็บน้ำฝน ระบบลำเลียงน้ำฝนใช้ในการ ลำเลียงน้ำฝนจากหลังคาไปสู่ถังเก็บน้ำฝนโดยผ่านตัวกรองเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำฝน อาทิเช่น อนุภาคขนาดเล็ก เศษใบไม้ และมูลสัตว์ เป็นต้น ถังเก็บน้ำฝนมีหลายขนาดตั้งแต่ถังขนาดเล็กซึ่งมักติด ตั้งอยู่บนพื้นดินมีขนาด 65 แกลลอน ไปจนถึงถังขนาดใหญ่ที่ติดตั้งอยู่ใต้ดินซึ่งสามารถกักเก็บน้ำฝนได้

หลายพันแกลลอน ระบบกักเก็บน้ำฝนสามารถเก็บน้ำฝนได้ถึง 623 แกลลอน ในฝนปริมาณ 1 นิ้วและพื้นที่หลังคารับน้ำ 1,000 ตารางฟุต การออกแบบถังเก็บน้ำฝนที่ดีสามารถกักตุนคุณภาพขนาดเล็กลง และป้องกันการเติบโตของสาหร่ายและแบคทีเรียได้ (König, K.W. และ AG, D.W., 2001, Fewkes, A., 2006)

ระบบกักเก็บน้ำฝนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามระบบการลำเลียงน้ำฝนเข้าสู่อาคารได้แก่

- 1) ระบบจ่ายน้ำด้วยแรงโน้มถ่วง เป็นระบบที่ตำแหน่งถังเก็บน้ำฝนอยู่บนหลังคาแล้วจ่ายน้ำฝนเข้าสู่อาคารโดยตรงด้วยแรงโน้มถ่วง
- 2) ระบบจ่ายน้ำด้วยปั๊มทางอ้อม เป็นระบบที่น้ำฝนจะถูกปั๊มจากถังเก็บน้ำฝนด้านล่างไปสู่ถังเก็บน้ำใบที่ 2 ที่อยู่บนหลังคาแล้วจ่ายน้ำฝนเข้าสู่อาคารด้วยแรงโน้มถ่วง
- 3) ระบบจ่ายน้ำด้วยปั๊มทางตรง เป็นระบบที่น้ำฝนจะถูกปั๊มจากถังเก็บน้ำฝนด้านล่างเข้าสู่อาคารโดยตรง (Leggett, D. และคณะ, 2001)



รูปที่ 2.1 ระบบกักเก็บน้ำฝนประเภทจ่ายน้ำฝนด้วยปั๊มทางอ้อม

ที่มา: (Roebuck, R., 2007)

2.2.3 หลังคาเขียว

หลังคาเขียว (Green Roof) หรือสวนหลังคา หมายถึงหลังคาที่ปิดทับบางส่วนหรือทั้งหมดด้วยพืชพรรณพื้นเมืองซึ่งปลูกอยู่บนดิน ทราาย หรือกรวด ซึ่งอยู่บนแผ่นชั้นกันน้ำและอาจมีส่วนประกอบอื่น เช่น แผ่นชั้นกันราก ระบบระบายน้ำ และระบบรดน้ำต้นไม้ อาจปลูกในถาดเพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษาหรือบนพื้นดินที่แผ่กระจายไปทั่วหลังคา และอาคารบางหลังอาจต้องการปรับปรุงโครงสร้างของหลังคาเพื่อรองรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหลังคาเขียว

ที่มา: heatusa.com

หลังคาเขียวสามารถจำแนกได้เป็นแบบดูแล (Intensive) แบบกึ่งดูแล (Semi-intensive) หรือแบบปล่อย (Extensive) ขึ้นอยู่กับขนาดความลึกของดินปลูกและความต้องการในการดูแลรักษา หลังคาเขียวแบบปล่อยมักใช้ดินปลูกความลึกประมาณ 5-15 เซนติเมตรและตอบโจทย์ด้านความสวยงามได้ดี ขณะที่หลังคาเขียวแบบดูแลมักใช้ดินปลูกความลึกมากกว่า 15 เซนติเมตรแต่มีความทนทานต่อสภาพน้ำได้ดีมากกว่าหลังคาเขียวแบบปล่อย

หลังคาเขียวสามารถปกป้องหลังคาอาคารจากสภาวะอากาศ ลม รังสียูวี และลดอุณหภูมิลงได้ ช่วยยืดอายุการใช้งานของหลังคาให้ยืนยาวไปได้อีก 2-3 เท่า และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (WBDG, 2016) นอกจากนี้หลังคาเขียวยังช่วยลดปริมาณน้ำฝนที่จะไหลบ่าไปรวมกับน้ำเสียชุมชน (Combined sewer overflow; CSO) ได้ถึงร้อยละ 26 (PlaNYC Stormwater, 2008)



รูปที่ 2.3 หลังคาเขียวใน Lancaster, Pennsylvania, USA.

ที่มา: (UNEP, 2014)

2.2.4 พื้นที่สีเขียว

พื้นที่สีเขียว หมายถึงพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยหญ้า ต้นไม้ หรือพืชพรรณอื่นๆ เป็นการกักเก็บและกรองน้ำโดยธรรมชาติ สิ่งเหล่านี้มีความสำคัญกับเมืองเพราะสามารถช่วยรับมือกับการไหลบ่าของน้ำฝนในพื้นที่ขนาดใหญ่ที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านพื้นผิวได้ เช่น ถนน เป็นต้น ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงสวนน้ำฝนและทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีคล้ายกันแต่ก็ยังมีการทำงานที่แตกต่างกันเล็กน้อย

สวนน้ำฝน (Rain Garden) เป็นการออกแบบพื้นดินที่เป็นแอ่งรองรับน้ำที่สามารถซึมและกรองน้ำฝนได้ ประกอบด้วยพืชพรรณและอาจจะมีท่อระบายใต้ดิน สวนน้ำฝนถูกออกแบบมาพิเศษให้สามารถรับมือกับปริมาณน้ำฝนปริมาณมากได้ เพื่อลดปริมาณน้ำฝนที่จะเข้าไปยังระบบระบายน้ำเสีย การออกแบบสวนน้ำฝนสามารถขุดส่วนท้ายของสวนน้ำฝนเพื่อเป็นแหล่งกักเก็บน้ำฝนได้

ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม (Bioswales) เป็นพื้นดินที่สามารถกรองมลพิษจากน้ำฝน ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างสวนน้ำฝนและทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม คือ จุดประสงค์หลักของทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุมมีไว้เพื่อใช้ขนส่งน้ำจากพื้นที่หนึ่งไปพื้นที่อื่นๆ (ส่วนใหญ่มักไปที่สวนน้ำฝน) ระยะเวลาที่น้ำฝนอยู่ในทางจะช่วยเพิ่มการกรองมลพิษ ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุมถูกออกแบบมาเพื่อจัดการกับน้ำฝนปริมาณมากๆ จากพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ เช่น ถนนคอนกรีต ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุมประกอบด้วยเส้นทางการระบายน้ำ มีด้านข้างลาดชัน และมีพืชพรรณอยู่ที่ส่วนกลาง คล้ายกับสวนน้ำฝนคือประกอบด้วยพืชพรรณที่มีความทนทานสูงกับสภาวะชุ่มน้ำ เช่น หญ้าพื้นเมือง สามารถติดตั้งข้างๆพื้นที่ทางเดิน ลานจอดรถ ฟุตบาท ถนน เป็นต้น แต่ไม่เหมาะกับพื้นที่เมืองแออัดเนื่องจากต้องการใช้พื้นที่ค่อนข้างกว้าง



รูปที่ 2.4 สวนน้ำฝน

ที่มา: <https://sailorstales.wordpress.com>



รูปที่ 2.5 ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม

ที่มา: <https://www.soils.org>

2.2.5 คอนกรีตพรุน

คอนกรีตพรุน (Pervious concrete, porous concrete หรือ no-fines concrete) เป็นคอนกรีตมวลเบาชนิดหนึ่งที่มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากคอนกรีตทั่วไป คือภายในเนื้อคอนกรีตมีรูพรุนและโพรงที่ต่อเนื่องในปริมาณมากซึ่งยอมให้อากาศหรือน้ำผ่านได้ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ในประเทศอังกฤษ อเมริกา และญี่ปุ่น ได้มีการคิดค้นและพัฒนาคอนกรีตพรุนใช้และในงานก่อสร้างเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อมมากกว่า 40 ปี ลักษณะทั่วไปของคอนกรีตพรุนคือคอนกรีตที่ไม่มีมวลรวมละเอียดหรือมีในปริมาณเล็กน้อยซึ่งจะอยู่ในส่วนผสมของเพสต์ โดยเพสต์นี้จะทำหน้าที่เชื่อมประสานมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นคอนกรีตพรุนจึงประกอบด้วย 3 ส่วน โดยส่วนแรกคือมวลรวมหยาบที่มีขนาดไม่ต่อเนื่อง (Open grade) หรือขนาดเดียว (Single grade) ได้แก่ หิน กรวด มวลรวมรีไซเคิล หรือวัสดุอื่นๆ มีปริมาณร้อยละ 60 – 70 โดยปริมาตร ส่วนที่สองคือส่วนที่เป็นเพสต์ทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานมวลรวมหยาบเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์และน้ำเป็นหลัก แต่อาจมีส่วนผสมเพิ่ม เช่น สาร

ลดน้ำพิเศษ สารผสมเพิ่ม (Admixture) หรือวัสดุผสมเพิ่ม (Additive) เข้าไปเล็กน้อย คอนกรีตพูนมี ปริมาณเพชรร้อยละ 15 – 25 โดยปริมาตร และส่วนสุดท้ายคือโพรงช่องว่าง คอนกรีตพูนที่ยอมให้น้ำ ไหลผ่านได้ดีจะมีขนาดของโพรงช่องว่าง (Pore size) อยู่ระหว่าง 60 – 70 มิลลิเมตร มีปริมาณโพรง (Void content) อยู่ระหว่างร้อยละ 15 – 35 โดยปริมาตร โดยคอนกรีตพูนโดยทั่วไปมีค่าอัตราการไหล ผ่านของน้ำ (Drainage rate) อยู่ระหว่าง 0.14 – 1.22 เซนติเมตร/วินาที และมีกำลังอัดอยู่ประมาณ 2.8 – 28.0 เมกะปาสกาล (American Concrete Institute, 2010)

คอนกรีตพูนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมและสถาปัตยกรรมได้อย่าง หลากหลาย เช่น คอนกรีตทางเดินเท้า คอนกรีตลานจอดรถหรือถนนที่การจราจรไม่หนาแน่นมาก พื้น สนามเทนนิส พื้นเรือนเพาะชำ ใช้ในงานตกแต่งภูมิทัศน์ งานลาดผิวคลองระบายน้ำ คอนกรีตปูพื้นทาง เท้าที่ไม่ต้องการให้น้ำซังหรือปลุกหญ้าได้ เป็นต้น (วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2016)

2.2.6 ถนนและตรอกสีเขียว

ตรอกหรือซอยในเมืองส่วนใหญ่มักเป็นพื้นที่สาธารณะที่อยู่ติดกับทรัพย์สินส่วนตัวของผู้อยู่อาศัยหรือประชาชนในระแวกนั้น เพื่ออำนวยความสะดวกการเข้าถึงของเจ้าหน้าที่ เช่น เจ้าหน้าที่ดับเพลิง เจ้าหน้าที่ตำรวจ และ การบริการจัดส่งสินค้า รวมถึงเพื่อการบริหารจัดการการระบายน้ำ และการระบายความร้อนของอาคารและสิ่งก่อสร้างอื่นๆ ในระแวกนั้น ตรอกหรือซอยของในเมืองมักจะมี พื้นผิวดั้งเดิมที่ทำจากวัสดุที่ไม่สามารถซึมผ่านได้ เช่น ยางมะตอยและคอนกรีต เป็นต้น เพราะมี วัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถระบายน้ำฝน หรือ Run off ได้อย่างรวดเร็ว และเพื่อให้เหมาะกับการใช้ ยานพาหนะ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความถี่ของฝนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลกระทบของเปลี่ยนแปลงทาง สภาพภูมิอากาศอย่างรุนแรง และหากการมีพื้นผิวที่ยากต่อการซึมผ่านก็อาจจะส่งผลให้เกิดน้ำท่วมขัง ในพื้นที่ได้ พื้นผิวของตรอกซอยที่มีการใช้วัสดุที่มีสีเข้ม หรือในกรณีที่ไม่มีร่มเงา ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ทำให้อุณหภูมิของอากาศรอบๆ อาคารเพิ่มสูงขึ้น โดยผลที่ตามมาก็คือความต้องการพลังงานที่ เพิ่มขึ้นสำหรับระบบระบายความร้อน หรือระบบทำความเย็นของอาคารซึ่งถือว่าการเพิ่มต้นทุน และค่าใช้จ่ายสำหรับผู้ประกอบการหรือเจ้าของอาคารนั่นเอง นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นก็ยังเป็นการ เพิ่มความรุนแรงของปรากฏการณ์เกาะความร้อน หรือ Urban Heat Island (UHI) ที่สามารถ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพอากาศของเมืองได้ ตรอกหรือซอยสีเขียวเป็นอีกแนวความคิดหนึ่งที่ถูก นำมาเป็นแนวทางในการช่วยจัดการกับผลกระทบเหล่านี้ซึ่งแนวคิดตรอกหรือซอยสีเขียวนี้เป็น ตัวอย่างของนวัตกรรมด้านโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว ที่รวมถึงพื้นที่ใกล้เคียงรอบๆ ด้วยการผสมผสานเข้าด้วยกันเพื่อทำให้เกิดประโยชน์หลายประการ และเป็นการใช้วิธีการสร้างประโยชน์แบบองค์รวม เพื่อ

เป็นการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้แนวคิดตรอกหรือซอยสีเขียวได้นำวิธีการด้านโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในหลายๆรูปแบบมาใช้เพื่อให้เกิดการบรรลุเป้าหมายในด้านการจัดการน้ำฝน การลดความร้อน และการอนุรักษ์พลังงาน อาทิเช่น

- ระบบสวนน้ำฝน (Rain-gardens)
- ระบบแยกและกักเก็บน้ำฝน (Downspout disconnects and rain-barrels)
- การปลูกพืชยืนต้น (Tree-planting)
- การออกแบบพื้นที่รับน้ำ (Landscaping and bio-swales)
- ระบบถังกักเก็บน้ำ (Cisterns)
- ระบบหลังคาเขียว (Eco-roofs) (Foster, J. และคณะ, 2011)

2.3 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบต่อปริมาณน้ำฝน

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) คือการเปลี่ยนแปลงลักษณะอากาศเฉลี่ยในพื้นที่หนึ่ง ลักษณะอากาศเฉลี่ย หมายถึงถึงลักษณะทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับอากาศ เช่น อุณหภูมิ ฝน ลม เป็นต้น ในความหมายตามกรอบของอนุสัญญาว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ FCCC (Framework Convention on Climate Change) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอันเป็นผลทางตรงหรือทางอ้อมจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ทำให้องค์ประกอบของบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไปนอกเหนือจากความผันแปรตามธรรมชาติ (United Nations, 1992) แต่ความหมายที่ใช้ในคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศไม่ว่าจะเนื่องมาจากความผันแปรตามธรรมชาติ หรือกิจกรรมของมนุษย์ (IPCC, 2001) กิจกรรมของมนุษย์ที่มีผลทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง คือ กิจกรรมที่ทำให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect) รุนแรงกว่าที่ควรจะเป็นตามธรรมชาติ และส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกสูงขึ้น เรียกว่า ภาวะโลกร้อน (Global warming)

2.3.2 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำฝน

แบบจำลองสภาพภูมิอากาศจากหลายๆประเทศ ชี้ว่าภายในปีค.ศ. 2100 เหตุการณ์น้ำท่วมรุนแรง จะมีความถี่ในการเกิดเพิ่มขึ้นหลายเท่าจากเมื่อก่อน โดยจะมีโอกาสเกิดขึ้น 3-6 ครั้ง ในช่วง 100 ปี ขณะที่สมัยก่อนที่มีโอกาสเกิดเพียง 1 ครั้งในรอบ 100 ปี เขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มี

แนวโน้มน้ำที่จะเกิดฝนตกหนัก และน้ำท่วมบ่อยครั้งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภาวะโลกร้อน ทำให้มีการละลายของภูเขาน้ำแข็งแถบขั้วโลกที่เพิ่มมากขึ้น เป็นสาเหตุให้ปริมาณน้ำในแม่น้ำและทะเลเพิ่มขึ้นตามลำดับ ในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา พื้นที่ชุมชนของประเทศไทยมักจะประสบกับปัญหาอุทกภัยบ่อยครั้ง โดยส่วนใหญ่จะเกิดในเขตชุมชนที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดอุทกภัย โดยเฉพาะแถบชายฝั่งด้านตะวันออกและทางใต้ของประเทศซึ่งตั้งอยู่ใกล้มหาสมุทร ในเขตเมืองใหญ่อย่าง กรุงเทพมหานคร หาดใหญ่ และเชียงใหม่ก็ประสบปัญหาน้ำท่วมเช่นกัน โดยเฉพาะช่วงฤดูฝน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำมีมากกว่าความสามารถในการกักเก็บ และระบบระบายน้ำยังไม่มีประสิทธิภาพพอ

ผลกระทบจากการเกิดน้ำท่วมนำมาซึ่งความเสียหายอย่างมหาศาลต่อชีวิตและทรัพย์สิน น้ำที่ไหลบ่าเข้าท่วมพื้นที่ได้ทำลายสิ่งที่เป็นโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ถนน สิ่งก่อสร้างต่างๆ ทำลายพืชผลทางการเกษตร ซะล้างหน้าดินทำให้ดินเสื่อมสภาพ เกิดการปนเปื้อนของน้ำ ส่งผลต่อการแพร่ของโรคระบาดทั้งในมนุษย์ พืชและสัตว์ มีผลให้ประชาชนเกิดวิกฤตทางอารมณ์ซึ่งมีผลต่อการก่ออาชญากรรมที่สูงขึ้น (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2015)

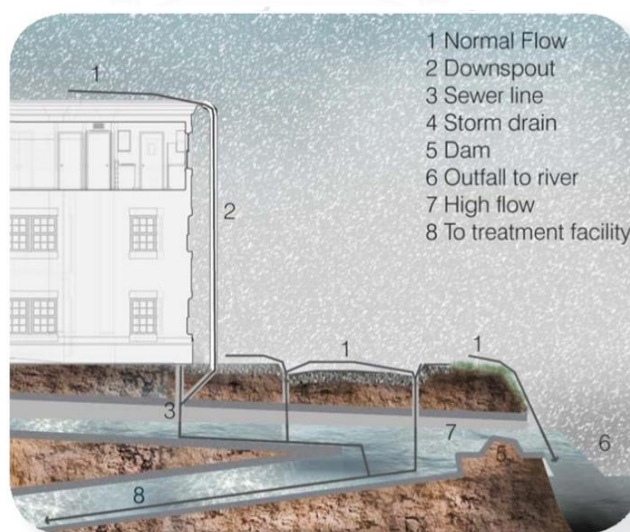
2.4 การจัดการน้ำฝน (Stormwater management)

2.4.1 การไหลบ่าของน้ำ

การไหลบ่าของน้ำ (Surface runoff) จะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวทั้งหมดที่น้ำซึมผ่านหรือไม่สามารถซึมผ่านได้นั้นเต็มไปด้วยน้ำซึ่งอาจมาจากน้ำฝน น้ำที่มาจากหิมะละลาย หรือมาจากน้ำแข็งละลาย (Durrans, S.R. และ Dietrich, K., 2003) พื้นผิวสามารถดูดซับน้ำไว้ได้จนถึงจุดอิ่มตัวหลังจากนั้นปริมาณน้ำฝนส่วนเกินจะไหลบ่าไปตามแรงโน้มถ่วงจากที่สูงไปสู่ที่ต่ำ ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติที่ใกล้ที่สุด โดยจุดอิ่มตัวนี้จะขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ลักษณะภูมิประเทศ ชนิดของพืชและสัตว์ในพื้นที่ และอัตราการระเหยของน้ำ (Pierpont, L.H., 2008) ลักษณะการใช้ประโยชน์พื้นที่เมืองซึ่งมนุษย์สร้างพื้นผิวที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impervious surfaces) อาทิเช่น ดาดฟ้าอาคาร พื้นคอนกรีต ลานจอดรถ และถนนยางมะตอย ความหนาแน่นของชุมชนเมืองที่มากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้รูปแบบการไหลของน้ำผิวดินมีความซับซ้อนและไม่เป็นไปตามธรรมชาติ ชัดขวางไม่ให้น้ำฝนที่ตกลงมาซึมลงสู่ชั้นใต้ดิน จึงเกิดการสะสมเป็นปริมาณน้ำผิวดินจำนวนมากที่ต้องทำการระบายออกจากพื้นที่อย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เกิดน้ำท่วมขังต่อไป

2.4.2 ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

ปัจจุบันระบบการบริหารจัดการน้ำผิวดินในพื้นที่เมืองขนาดใหญ่ ส่วนมากยังเป็นแบบอนุรักษ์นิยม (Conventional Stormwater Management) ซึ่งมีแนวคิดพื้นฐานว่า “น้ำผิวดินเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ต้องจัดการระบายออกจากพื้นที่อย่างรวดเร็วที่สุด” (County Prince George’s, 1999) ระบบการจัดการน้ำดังกล่าวให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพความรวดเร็วของการระบายน้ำออกจากพื้นที่ไม่ว่าจะมีปริมาณมากเพียงใดก็ตาม ดังนั้นองค์ประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ถนน หลังคา รางระบายน้ำ ขอบทาง ท่อน้ำ ลานจอดรถ จึงได้รับการออกแบบให้สามารถลำเลียงน้ำผิวดินออกจากพื้นที่ได้อย่างรวดเร็วที่สุด น้ำผิวดินจำนวนมากจะไหลลงสู่ท่อระบายน้ำใต้ดิน ก่อนลำเลียงไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสียรวมขนาดใหญ่ที่ปลายทาง (end-of-pipe-system) และบางส่วนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ มลพิษปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ มลพิษปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน และการกัดเซาะชายฝั่ง (Ferguson, B.K. และ France, R., 2002) ระบบการบริหารจัดการน้ำแบบอนุรักษ์นิยมนี้ ไม่เปิดโอกาสให้ระบบอุทกวิทยา (Hydrologic cycle) ในพื้นที่สามารถทำหน้าที่ของตัวเองได้อย่างที่ควรจะเป็นตามธรรมชาติ นอกจากนี้เมื่อระบบระบายน้ำมีอายุเก่าแก่ก็จำเป็นต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการซ่อมแซมหรือก่อสร้างใหม่ นอกจากนี้การทำหน้าที่ระบายน้ำออกจากพื้นที่แล้ว ระบบนี้ไม่สามารถตอบสนองการเป็นแหล่งน้ำสำหรับใช้อุปโภค สิ่งอำนวยความสะดวกของชุมชน (Community facilities) การเป็นภูมิทัศน์ที่ดีของชุมชน ตลอดจนเป็นถิ่นที่อยู่ของสัตว์ท้องถิ่นในพื้นที่ได้ (ศนิ ลิ้มทองสกุล, 2554)



รูปที่ 2.6 ระบบการจัดการน้ำแบบอนุรักษ์นิยม

ที่มา: (Johnson, A., 2013)

2.4.3 ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวเป็นระบบที่มีการนำเอาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวมาประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำ เช่น หลังคาเขียว สวนน้ำฝน ทางเท้าที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ และระบบกักเก็บน้ำฝน โดยกลไกหลักของการใช้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในการจัดการน้ำคือการซึมน้ำลงดินและการกักเก็บน้ำฝนที่แหล่งกำเนิด ช่วยในการลดปริมาณและชะลอน้ำฝนไหลบ่า เต็มน้ำใต้ดิน กรองน้ำผิวดิน และช่วยรักษาคุณภาพน้ำในแม่น้ำลำคลอง เป็นต้น (Gallet, D., 2011) นอกจากนี้ โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ ทั้งด้านสังคม เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อมซึ่งไม่สามารถได้รับจากระบบการจัดการน้ำแบบอนุรักษ์นิยม



รูปที่ 2.7 ระบบการจัดการน้ำด้วยโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

ที่มา: (Johnson, A., 2013)

2.5 กรณีศึกษาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในต่างประเทศ

2.5.1 Chicago

แผนการพัฒนาเมืองสีเขียวของเมือง Chicago ได้รับการขับเคลื่อนโดยความร่วมมือระหว่างหน่วยงานรัฐ องค์กรไม่แสวงผลกำไรและภาคเอกชนเพื่อการจัดการน้ำท่วมและรวมถึงผลกระทบด้านความร้อนของเมืองอีกด้วย มีการนำเอาเทคโนโลยีสีเขียวต่างๆ มาใช้ เช่น ทางเท้าที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (Permeable pavement) หลังคาเขียว สวนน้ำฝน และตรอกสีเขียว โดยมีเป้าหมายหลักในการดักจับน้ำฝน ในปี ค.ศ.2007 เมือง Chicago มีตรอก 30 แห่งที่ติดตั้งทางเท้าซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านได้ และคอนกรีตที่ช่วยลดปรากฏการณ์เกาะความร้อน (high-reflectivity concrete) ออกแบบรองรับน้ำฝนให้แยกออกจากระบบรับน้ำเสียเพื่อลดภาระการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถแยกน้ำฝนโดยการกัก

เก็บไว้ในใช้ประโยชน์ต่อไป เช่นรดน้ำต้นไม้ ล้างรถ เป็นต้น เมือง Chicago สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียของเมืองได้ 190,266 เมกะวัตต์ต่อปี

อีกตัวอย่างหนึ่งของเมือง Chicago คือหลังคาเขียวที่ขนาด 20,300 ตารางฟุต บนหลังคาอาคารศาลาว่าการของเมือง Chicago โดยใช้ต้นไม้ถึง 20,000 ต้น กว่า 150 สายพันธุ์ หลังคาเขียวนี้ช่วยปรับสภาพอากาศโดยรอบให้ดีขึ้น ส่งผลให้ลดการใช้เครื่องทำความร้อนและเครื่องปรับอากาศของอาคาร และยังเป็นทิวทัศน์สำหรับผู้คนบนตึกข้างเคียง เป็นที่คาดการณ์ว่าหลังคาเขียวช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าไปได้ 9,270 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และการใช้ก๊าซธรรมชาติสำหรับระบบทำความร้อน 740 ปีที่ยุติ ซึ่งคิดเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกมากกว่า 6.3 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี (Foster, J. และคณะ, 2011)



รูปที่ 2.8 หลังคาเขียวของอาคารศาลาว่าการของเมือง Chicago
ที่มา: (Foster, J. และคณะ, 2011)

2.5.2 Portland

ในเมือง Portland มีปัญหาน้ำฝนไหลบ่าลงสู่แม่น้ำลำธารซึ่งน้ำฝนมีการปนเปื้อนจากอาคารบ้านเรือนและถนนรวมทั้งน้ำเสียที่เอ่อล้นมาจากท่อระบายน้ำเสีย ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น ในปีค.ศ. 1991 รัฐบาลท้องถิ่นได้ใช้งบประมาณ 1.4 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ เพื่อปรับปรุงท่อระบายน้ำเสียขนาดใหญ่ที่สามารถรองรับน้ำเสียได้ขณะมีพายุ ในปีค.ศ. 2004 เมือง Portland ต้องเผชิญกับพายุฝนขนาดใหญ่ซึ่งเกินกว่าความสามารถในการระบายน้ำเสียของเมืองถึง 50 เท่า เหตุการณ์นี้ทำให้มีน้ำเสียปริมาณ 2.8 ล้านแกลลอน ถูกปล่อยลงสู่แม่น้ำลำธาร ทั้งนี้พื้นที่ของเมือง Portland ประมาณร้อยละ 50 น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ ซึ่งเป็นถนนร้อยละ 25 และมีหลังคาประมาณร้อยละ 40 ดังนั้นเมื่อไม่นานมานี้รัฐบาลได้มีการสนับสนุนทางการเงินให้กับประชาชนในการติดตั้งหลังคาเขียวและถอดวางรับน้ำฝนออกจากระบบน้ำเสีย และยังมี การปรับปรุงถนนให้มีสวนน้ำฝนและลักษณะพื้นดินอื่นๆ ที่เลียนแบบระบบทางธรรมชาติเพื่อรองรับ

และลดปริมาณน้ำฝนที่จะเข้าไปสู่อ่างรับน้ำเสีย ป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์เหมือนอย่างที่เคยเกิดขึ้นในปีค.ศ. 2004 ซึ่งถือได้ว่าเป็นการลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว 8 ล้านดอลลาร์และสามารถลดการลงทุนในระบบรองรับน้ำเสียไปได้ 250 ล้านดอลลาร์ นอกจากนี้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวยังช่วยให้ อสังหาริมทรัพย์ของเมืองมีมูลค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย (Foster, J. และคณะ, 2011)

2.6 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

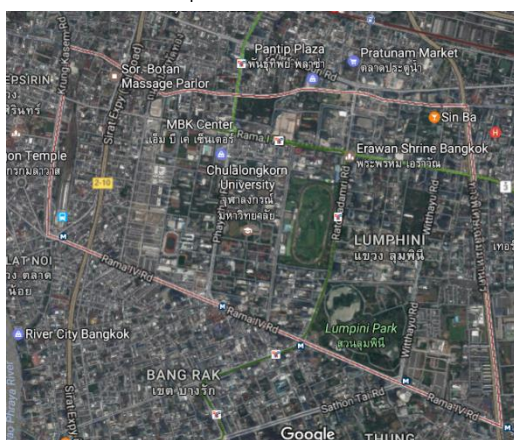
กรุงเทพมหานคร

กรุงเทพมหานครเป็นเมืองหลวงและเป็นนครที่มีประชากรมากที่สุดของประเทศไทย เป็นศูนย์กลางการปกครอง การศึกษา การคมนาคมขนส่ง การเงินการธนาคาร การพาณิชย์ การสื่อสาร และความเจริญของประเทศ ตั้งอยู่ในบริเวณภาคกลางตอนล่างของประเทศไทย บริเวณละติจูดที่ 13.45 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.28 องศาตะวันออก มีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 1,568.7 ตารางกิโลเมตร แบ่งออกเป็น 50 เขตปกครอง

ลักษณะภูมิประเทศของกรุงเทพมหานครเป็นที่ราบลุ่ม มีระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 1.50 – 2 เมตร โดยมีความลาดเอียงของระดับพื้นดินจากทิศเหนือจะค่อยๆ ลาดเอียงสู่อ่าวไทยทางทิศใต้และเฉพาะลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลไม่เกิน 1.50 เมตร ตั้งอยู่บนพื้นที่ซึ่งในทางภูมิศาสตร์เรียกว่าบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำซึ่งเกิดจากดินตะกอนลุ่มน้ำเป็นพื้นที่อุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การเพาะปลูกข้าวและพืชประเภทต่างๆ (ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร, 2560)

เขตปทุมวัน

เขตปทุมวัน เป็น 1 ใน 50 เขตการปกครองของกรุงเทพมหานคร อยู่ในกลุ่มกรุงเทพใต้ ซึ่งถือเป็นเขตศูนย์กลางธุรกิจ การค้า การบริการ การพยาบาล วัฒนธรรม การศึกษา และการทูต เป็นเขตหนึ่งที่มีที่ตั้งอยู่บริเวณใจกลางที่สุดของกรุงเทพมหานคร มีเนื้อที่ประมาณ 8.369 ตารางกิโลเมตร และมีจำนวนประชากร 50,673 คน (สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล, 2558)



รูปที่ 2.9 แผนที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

ที่มา: Google map

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นสถาบันอุดมศึกษาแห่งแรกของประเทศไทย ตั้งอยู่ที่เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร ถือกำเนิดจากโรงเรียนสำหรับฝึกหัดวิชาข้าราชการฝ่ายพลเรือน โดยได้รับพระมหากรุณาธิคุณจากพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว โปรดเกล้าฯ ให้ตั้งขึ้น ภายในพระบรมมหาราชวัง เมื่อ พ.ศ.2442 พร้อมทั้งพระราชทานพระบรมราชานุญาตให้อัญเชิญ “พระเกี้ยว” มาเป็นเครื่องหมายประจำโรงเรียน การดำเนินงานของโรงเรียนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเป็นลำดับ จนกระทั่งเมื่อวันที่ 26 มีนาคม พ.ศ.2459 พระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว ได้ทรงประดิษฐานขึ้นเป็นมหาวิทยาลัย และพระราชทานนามว่า “จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย”

ปัจจุบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีพื้นที่ทั้งหมด 1,153 ไร่ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามลักษณะการใช้พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่เขตการศึกษา 595 ไร่ พื้นที่ส่วนราชการเช่าใช้ 184 ไร่ และพื้นที่เขตพาณิชย์ 374 ไร่



รูปที่ 2.10 แผนที่พื้นที่เขตจัดการผลประโยชน์บริเวณเขตปทุมวัน

ที่มา: <http://www.property.chula.ac.th>

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

Zhang, Q. และคณะ (2015) ศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำและคุณภาพของน้ำฝนไหลบ่าเปรียบเทียบกับหลังคาแอสฟัลท์และหลังคาเขียวที่ปลูกต้น *Buddhanail (Sedum lineare)* โดยชั้นดินปลูกมีความหนา 15 เซนติเมตร ประกอบด้วยดินพรุ (Peat soil) เวอร์มิคูไลท์ เพอร์ไลต์ และซีลี้อยู่ ในอัตราส่วน 4:3:2:1 ทำการทดลองโดยวัดปริมาณน้ำฝนในแต่ละวันและปริมาณน้ำฝนที่สามารถกักเก็บได้ จากการศึกษาพบว่า หลังคาแอสฟัลท์สามารถกักเก็บน้ำฝนได้ 0.03 – 1.98 มิลลิเมตร เฉลี่ย 0.42 มิลลิเมตร หรือร้อยละ 0.31 – 18.84 เฉลี่ยร้อยละ 3.69 และหลังคาเขียวสามารถกักเก็บน้ำฝนได้ 2.50 – 35.66 มิลลิเมตร เฉลี่ย 11.61 มิลลิเมตร หรือร้อยละ 35.5 – 100 เฉลี่ยร้อยละ 77.2

Foster, J. และคณะ (2011) ศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียวเพื่อลดผลกระทบจากน้ำฝนไหลบ่า พบว่าหลังคาเขียวช่วยลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงระบบสาธารณะได้ถึงร้อยละ 50-90 ในพายุขนาดเล็ก (25 มิลลิเมตร) และอย่างน้อยร้อยละ 30 จากพายุขนาดใหญ่

Wang, X. และคณะ (2017) ศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำและคุณภาพของน้ำฝนไหลบ่าเปรียบเทียบกับหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยชั้นรองพื้น 1 ชั้นและ 2 ชั้น โดยทดลองด้วยปริมาณน้ำฝน 43.2 54.6 76.2 และ 86.4 มิลลิเมตรและปลูกต้น *Sedum lineare* พบว่า การปลูกด้วยชั้นรองพื้น 2 ชั้นโดยใช้ ชั้นดินปลูกเป็น Turfy soil 5 เซนติเมตร และใช้ เพอร์ไลต์ ถ่านกัมมันต์และเวอร์มิคูไลท์ ในอัตราส่วน 2.5:5:2.5 เซนติเมตรเป็นชั้นดูดซับ สามารถลดปริมาณน้ำฝนไหลบ่าและมีคุณภาพน้ำที่ดีที่สุด โดยสามารถลดปริมาณน้ำฝนไหลบ่าได้ร้อยละ 81.9 73.0 61.1 และ 47.7 ตามลำดับ เฉลี่ยร้อยละ 65.9 มีต้นทุนในการก่อสร้างประมาณ 105 ดอลลาร์/ตารางเมตร ขณะที่การปลูกด้วยชั้นรองพื้นเพียงชั้นเดียว ซึ่งประกอบด้วยดิน (Turf soil) เพอร์ไลต์ และเวอร์มิคูไลท์ ด้วยอัตราส่วน 1:1:1 ความหนา 15 เซนติเมตร จะสามารถลดปริมาณน้ำฝนไหลบ่าได้ร้อยละ 71.4 58.3 44.1 และ 36.3 ตามลำดับ เฉลี่ยร้อยละ 52.6 และมีต้นทุนในการก่อสร้างประมาณ 94 ดอลลาร์/ตารางเมตร

Guo, C. (2008) ศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช *Sedum lineare* ที่เมืองกว่างโจว ประเทศจีน โดยใช้ DeST simulation ในการวิเคราะห์ จากการศึกษาพบว่าหลังคาเขียวช่วยลดการใช้พลังงานสำหรับระบบปรับอากาศในอาคารได้ร้อยละ 3.83

Sailor, D.J. (2008) ศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหลังคาเขียวบนอาคารสำนักงานจำลองพื้นที่หลังคาขนาด 2,000 ตารางเมตรในเมืองชิคาโกและเมืองฮิวสตัน ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้การคำนวณจาก EnergyPlus พบว่าหลังคาเขียวช่วยให้ทั้ง 2 อาคารสามารถลดการพลังงานไฟฟ้ารายปีได้ร้อยละ 2 และลดการใช้ก๊าซธรรมชาติรายปีได้ร้อยละ 9 ในเมืองชิคาโก และร้อยละ 11 ในเมืองฮิวสตัน

Bell, R. และ Wheeler, J. (2006) ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้พืชพรรณช่วยรักษาคุณภาพน้ำโดยจะทำหน้าที่ช่วยกรองสิ่งปนเปื้อนไม่ให้ไหลลงแหล่งน้ำโดยตรงในเมือง Maryland พบว่าระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงร้อยละ 95 ฟอสฟอรัสร้อยละ 98 ไนโตรเจนร้อยละ 20 และแคลเซียมร้อยละ 20

McNeil, J. และ Vava, C. (2006) ศึกษาความสามารถในการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโครงสร้างสีเขียวในพื้นที่เมือง Oakville ซึ่งมีจำนวนต้นไม้ใหญ่ประมาณ 1.9 ล้านต้น พบว่าโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวสามารถที่จะเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับพื้นที่เมือง โดยต้นไม้ใหญ่ในเมืองมีการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าต้นไม้ใหญ่ในพื้นที่ชนบททั้งที่เป็นต้นไม้ชนิดเดียวกันมีรูปร่างและขนาดที่เท่ากันคิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดได้ 28,000 ตัน/ปี

Pouyat, R.V. และคณะ (2006) ศึกษาความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของดินในพื้นที่เมือง 6 เมืองได้แก่ Atlanta, Baltimore, Boston, Chicago, Oakland และ Syracuse พบว่าดินแต่ละพื้นที่มีความสามารถในการกักเก็บคาร์บอนที่ต่างกัน โดยพื้นที่ที่มีอากาศร้อนกว่าจะสามารถกักเก็บคาร์บอนได้มากกว่าเล็กน้อย และหากแบ่งตามลักษณะการใช้ที่ดินพบว่าดินในเขตพื้นที่อยู่อาศัยจะสามารถกักเก็บคาร์บอนได้มากที่สุด

Jim, C. และ Chen, W.Y. (2009) ศึกษาการใช้ต้นไม้พืชพรรณเป็นฉนวนกันเสียงระหว่างถนนกับชุมชนที่อยู่อาศัย พบว่าหากมีความหนาแน่นและระยะห่างของลำต้นที่เหมาะสม จะสามารถเป็นฉนวนกันเสียงที่มีประสิทธิภาพได้ และได้มีการประมาณว่าต้นไม้ที่มีระยะห่างระหว่างลำต้นประมาณ 4-5 เมตร พร้อมพุ่มหนาที่โคนต้นไม้สามารถช่วยลดเสียงลงได้ประมาณ 5 เดซิเบล

Brattebo, B.O. และ Booth, D.B. (2003) ศึกษาลานจอดรถที่ติดตั้งคอนกรีตพูนในด้านความคงทน การลดปริมาณน้ำฝนไหลบ่า และคุณภาพของน้ำที่แทรกซึมผ่านไปได้ พบว่าหลังการใช้งานทุกวันเป็นเวลา 6 ปี ไม่พบสัญญาณการสึกหรอของลานจอดรถ และน้ำฝนสามารถซึมผ่านไปได้

ทั้งหมดโดยแทบไม่มีน้ำฝนไหลบ่าบนพื้นผิวเลย ขณะที่ในด้านคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองพบว่า ปริมาณทองแดงและสังกะสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับน้ำฝนที่ไหลออกจากพื้นผิวยางมะตอย นอกจากนี้ยังตรวจพบน้ำมันเครื่องในตัวอย่างร้อยละ 89 ของตัวอย่างน้ำจากพื้นผิวยางมะตอย แต่ไม่พบน้ำมันเครื่องเลยในตัวอย่างน้ำฝนที่แทรกซึมผ่านคอนกรีตพอร์น

Pakzad, P. และ Osmond, P. (2016) ทำการศึกษาทบทวนและวิเคราะห์แบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้ในการประเมินศักยภาพของโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวแล้วทำการรวบรวมเกณฑ์และจำแนกตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับการประเมินโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว โดยแบ่งออกเป็น 4 ด้าน 30 ตัวชี้วัด ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับประเมินโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

Categories	Performance indicators
Ecological indicators	Climate and microclimatic modifications (e.g. Urban Heat Island effect mitigation; temperature moderation through evapotranspiration and shading; wind speed modification)
	Air quality improvement (e.g. Pollutant removal; Avoided emissions)
	Carbon Emissions (e.g. direct carbon sequestration and storage; avoided greenhouse gas emissions through cooling)
	Reduced building energy use for heating and cooling (through e.g. shading by trees; covering building by green roof and green walls)
	Hydrological regulation (e.g. flow control and flood reduction; regulation of water quality; water purification)
	Improved soil quality and Erosion prevention (e.g. soil fertility; soil stabilization)
	Waste decomposition and nutrient cycling
	Noise level attenuation

	Biodiversity-protection and enhancement (e.g. Communities; species; genetic resources; habitats)
Health indicators	Improving physical well-being (e.g. physical outdoor activity; healthy food; healthy environments)
	Improving social well-being (e.g. social interaction; social integration; community cohesion)
	Improving mental well-being (e.g. reduced depression and anxiety; recovery from stress; attention restoration; positive emotions)
Socio-cultural indicators	Food production (e.g. urban agriculture; kitchen gardens; edible landscape and community gardens)
	Opportunities for recreation, tourism and social interaction (community livability)
	Improving pedestrian ways and their connectivity (e.g. increasing safety; quality of path; connectivity and linkage with other modes)
	Improving accessibility
	Provision of outdoor sites for education and research
	Reduction of crimes and fear of crime (comfort; amenity and safety)
	Attachment to place and sense of belonging (cultural and symbolic value)
	Enhancing attractiveness of cities (e.g. enhancing desirable views; restricting undesirable views)
Economic indicators	Increased property values

	Greater local economic activity (e.g. tourism, recreation, cultural activities)
	Healthcare cost savings
	Economic benefits of provision services (e.g. raw materials; timber; food products; biofuels; medicinal products; fresh water etc.)
	Value of avoided CO ₂ emissions and carbon sequestration
	Value of avoided energy consumption (e.g. reduced demands for cooling and heating)

ที่มา: (Pakzad, P. และ Osmond, P., 2016)

พิศ คงบริรักษ์ และ กฤติกา สืบศักดิ์ (2011) ได้ศึกษาการระเหยของน้ำในประเทศไทย โดยการรวบรวมข้อมูลการระเหยของน้ำ (Evaporation) จากสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วง 10 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2544-2553 เพื่อวิเคราะห์การระเหยของน้ำในแต่ละพื้นที่ โดยใช้การนำเข้าโปรแกรม Surfer ซึ่งได้ข้อมูลเชิงพื้นที่ในลักษณะของจุด (Point) แล้ว Interpolate ข้อมูลด้วยวิธี Kriging Interpolate นำเสนอในรูปแบบแผนที่เชิงตัวเลขแสดงค่าปริมาณน้ำระเหยเฉลี่ยในคาบ 10 ปี ผลการศึกษาพบว่า การระเหยของน้ำมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่บริเวณประเทศไทยตอนบน (ภาคเหนือ ภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันออก) มีการระเหยของน้ำสูงกว่าพื้นที่บริเวณภาคใต้ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าช่วงที่มีการระเหยของน้ำสูงอยู่ในช่วงเดือนมีนาคม เมษายน และพฤษภาคม โดยเดือนเมษายนมีปริมาณการระเหยของน้ำสูงที่สุดในรอบปี โดยปริมาณการระเหยของน้ำเฉลี่ยของพื้นที่กรุงเทพมหานครช่วง พ.ศ.2544-2553 ในแต่ละเดือนแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการระเหยของน้ำเฉลี่ยของพื้นที่กรุงเทพมหานคร

เดือน	ปริมาณการระเหยของน้ำเฉลี่ยของพื้นที่กรุงเทพมหานคร (มิลลิเมตร/เดือน)
มกราคม	125
กุมภาพันธ์	125
มีนาคม	175
เมษายน	175
พฤษภาคม	150
มิถุนายน	150
กรกฎาคม	150
สิงหาคม	150
กันยายน	125
ตุลาคม	125
พฤศจิกายน	125
ธันวาคม	125

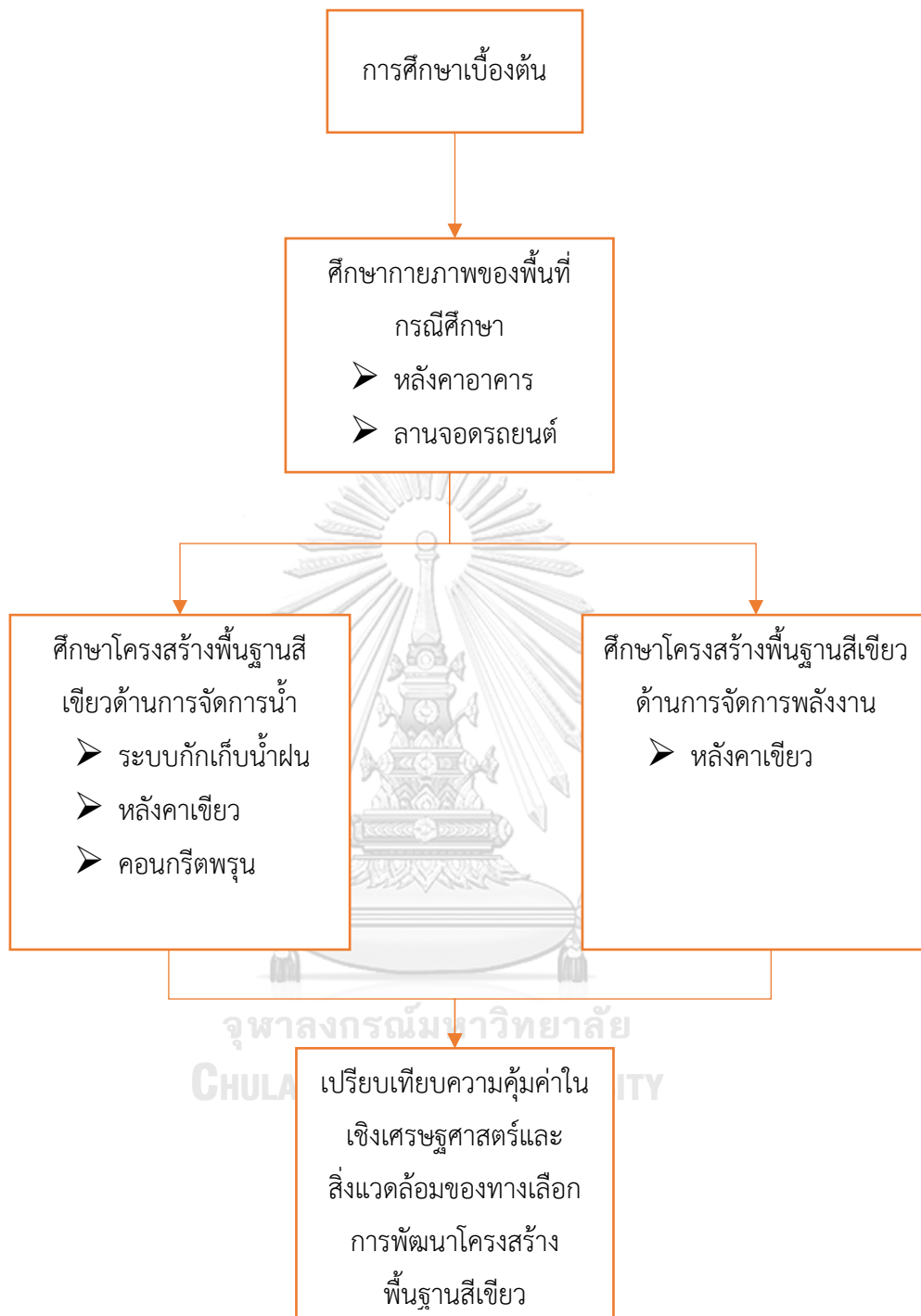
ที่มา: ดัดแปลงจาก (พิศ คงบริรักษ์ และ กฤติกา สืบศักดิ์, 2011)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวเป็นการนำวิถีทางธรรมชาติมาใช้ในการพัฒนาเมืองเพื่อบรรลุเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมและเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน ตัวอย่างเทคโนโลยีโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว คอนกรีตพรุน สวนน้ำฝน ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม และระบบกักเก็บน้ำด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำ เป็นต้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งหนาแน่นไปด้วยอาคารต่าง ๆ จึงไม่เหมาะกับการประยุกต์ใช้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวบางชนิด เช่น สวนน้ำฝน ทางระบายน้ำมีพืชพรรณปกคลุม และระบบกักเก็บน้ำด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำ เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวดังกล่าวเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่เปิดโล่งขนาดใหญ่ ดังนั้น จึงเลือก ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว และคอนกรีตพรุน ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่การศึกษาซึ่งมีความหนาแน่นของการพัฒนาสูงได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อประเมินศักยภาพการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สนใจ ได้แก่ การใช้หลังคาเขียว ระบบกักเก็บน้ำฝน และคอนกรีตพรุนในการลดปริมาณน้ำฝนที่ลงสู่ท่อระบายน้ำและการประหยัดพลังงานของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงได้จากการประยุกต์ใช้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในข้อ 1 และ 3) วิเคราะห์ความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่ศึกษาโดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาเบื้องต้น

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและติดต่อหน่วยงานประสานหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กรมอุตุนิยมวิทยา สำนักระบายน้ำ สำนักบริหารระบบกายภาพจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หรือหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการให้ข้อมูลหรือเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในงานวิจัย อาทิเช่น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณความต้องการน้ำของอาคาร พลังงานที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย พลังงานที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา เป็นต้น

สำหรับข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลสถิติปริมาณฝน 10 ปีย้อนหลังตั้งแต่ปีพ.ศ. 2551 - 2560 เนื่องจากการใช้ข้อมูลในปีดังกล่าวในการวิเคราะห์ข้อมูลจะสามารถสะท้อนถึงลักษณะการใช้พื้นที่ในปัจจุบันได้ดีที่สุด

3.2 การศึกษากายภาพของพื้นที่กรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศึกษากายภาพของพื้นที่กรณีศึกษาโดยการลงพื้นที่เก็บข้อมูลพื้นที่สีเขียวและใช้ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google map เป็นเครื่องมือในการหาขนาดพื้นที่โครงสร้างต่างๆ อาทิเช่น พื้นที่หลังคาอาคาร พื้นที่ลานจอดรถยนต์ เป็นต้น โดยทำการศึกษารอบคลุมพื้นที่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อคัดเลือกอาคารหรือพื้นที่ตัวอย่างที่มีความเหมาะสมและมีข้อมูลเพียงพอต่อการประเมินได้

สำหรับข้อมูลพื้นที่หลังคาอาคารที่ใช้สำหรับหลังคาเขียว จะเป็นอาคารที่มีลักษณะหลังคาเรียบแบนเท่านั้น โดยลงพื้นที่เก็บข้อมูลจากหลังคาอาคารต่างๆ ที่อยู่ในพื้นที่กรณีศึกษา วัดขนาดพื้นที่หลังคาที่สามารถทำหลังคาเขียวได้

สำหรับข้อมูลพื้นที่หลังคาอาคารที่ใช้สำหรับระบบกักเก็บน้ำฝน จะเป็นอาคารที่มีลักษณะหลังคาจั่วหรือเรียบแบน โดยลงพื้นที่สำรวจและคัดเลือกอาคารในพื้นที่กรณีศึกษาที่มีพื้นที่สามารถติดตั้งกักเก็บน้ำฝนได้

สำหรับข้อมูลพื้นที่ลานจอดรถยนต์ จะเป็นพื้นที่ลานจอดรถยนต์ที่ไม่มีหลังคาปกคลุม เป็นข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูล

3.3 ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวโดยทำการเก็บข้อมูลศึกษาจากเอกสารรายงานการวิจัยต่างๆ รวมทั้งการเก็บข้อมูลจากพื้นที่การใช้งานจริง โดยแบ่งโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวออกเป็น 3 ทางเลือก ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว และคอนกรีตพรุน โคนทำการศึกษาเกี่ยวกับ รูปแบบอุปกรณ์ที่ใช้ ปริมาณน้ำฝนที่สามารถกักเก็บได้ การช่วยประหยัดพลังงาน การช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวดังกล่าว

ในการประเมินศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวใช้ข้อมูลสถิติปริมาณน้ำฝนย้อนหลังเป็นระยะเวลา 10 ปี จากกรมอุตุนิยมวิทยา และกำหนดอายุโครงการ 50 ปี ซึ่งเป็นอายุการใช้งานของอาคารกำหนดโดยมูลนิธิประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย (องค์กรสาธารณประโยชน์) ดังนั้นค่าปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ และอื่นๆ จะถูกคูณด้วย 5 เพื่อให้สอดคล้องกับอายุโครงการที่ใช้ประเมิน

3.3.1 ระบบกักเก็บน้ำฝน

ศึกษาระบบกักเก็บน้ำฝน โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยา เป็นน้ำฝนสะสมรายวันระยะเวลา 10 ปีย้อนหลัง และใช้ข้อมูลพื้นที่หลังคารับน้ำของอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นกรณีศึกษา โดยน้ำฝนที่ตกลงสู่หลังคาจะถูกรวบรวมและกักเก็บไว้ที่ถังเก็บน้ำ และลำเลียงน้ำฝนไปใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปาภายในอาคาร

สามารถคำนวณอัตราการใช้น้ำประปาที่ลดได้ (W , ลูกบาศก์เมตร) ได้จากอัตราการใช้น้ำของอาคารและปริมาณน้ำฝนที่สามารถกักเก็บได้ในแต่ละวัน ซึ่งปริมาณน้ำฝนที่สามารถกักเก็บได้จะเป็นปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่หลังคาแต่ไม่เกินความจุของถังเก็บน้ำฝน จากนั้นมีการนำน้ำฝนที่กักเก็บไว้ได้ไปใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปาภายในอาคารและถ้าปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้มีมากกว่าความต้องการใช้น้ำของอาคารแล้วปริมาณน้ำฝนที่คงเหลือจะถูกนำไปคำนวณรวมกับปริมาณน้ำฝนที่จะเข้าสู่ระบบในวันถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 3.2

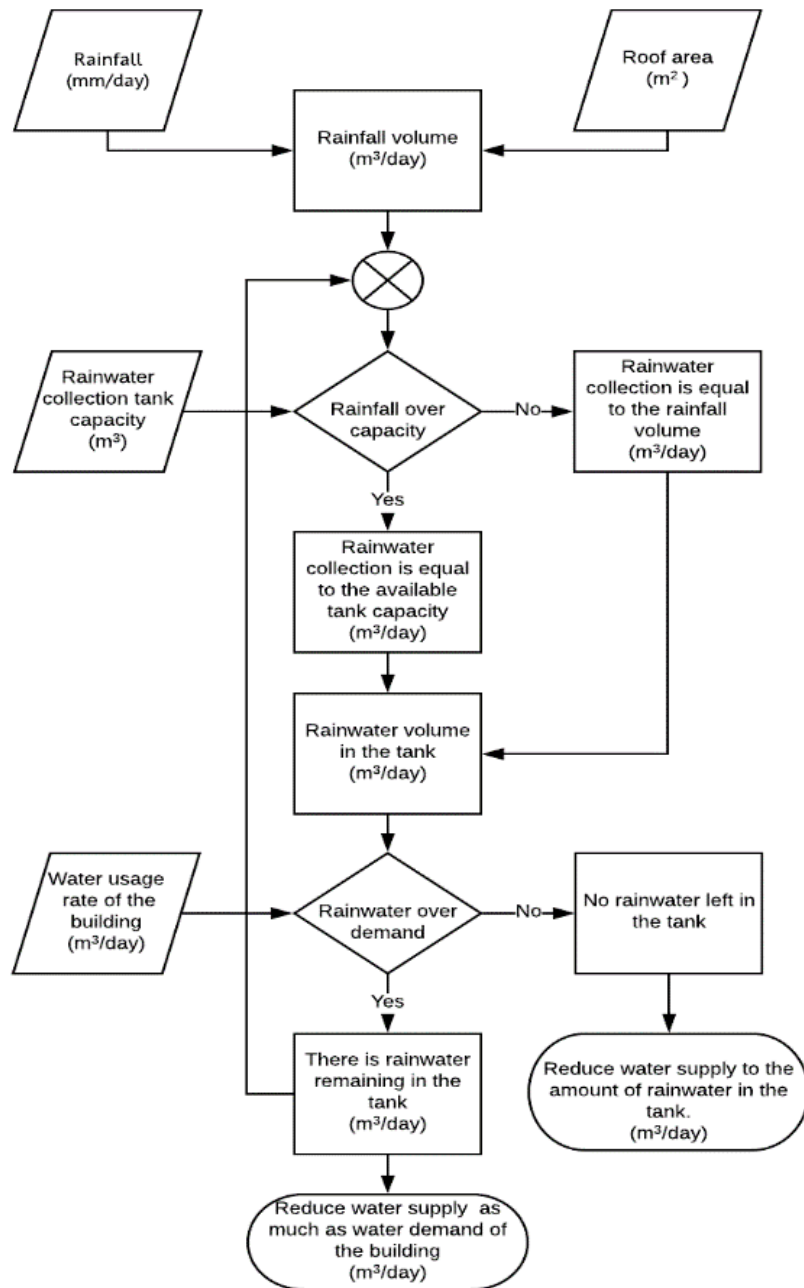
ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่หลังคาสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$V_n = \frac{H_n}{1,000} A$$

สมการที่ 3.1

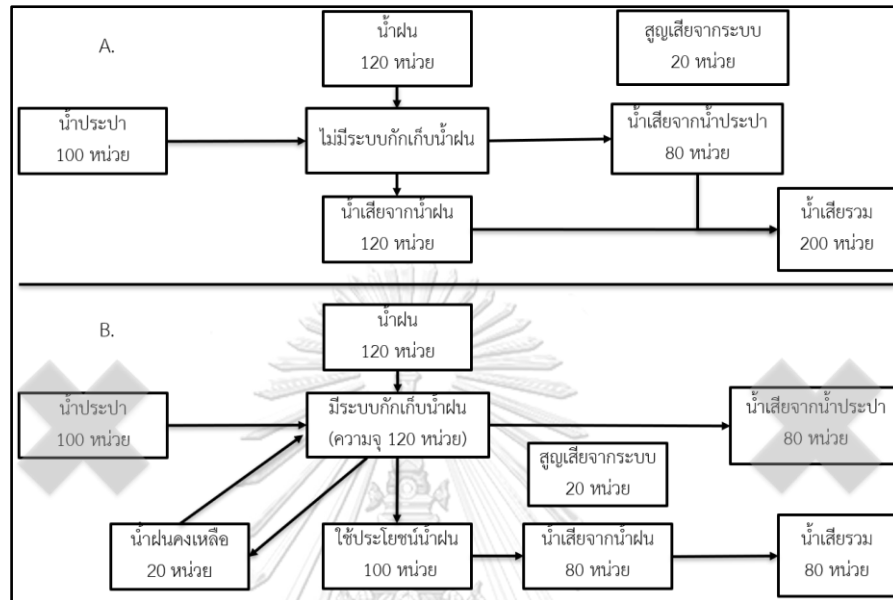
โดยที่

- V คือ ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่หลังคา (ลูกบาศก์เมตร/วัน)
- H คือ ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร/วัน)
- A คือ พื้นที่หลังคารับน้ำ (ตารางเมตร)
- n คือ วันที่สนใจ



รูปที่ 3.2 แนวทางการคำนวณอัตราการใช้น้ำประปาที่ลดได้

ระบบกักเก็บน้ำฝนช่วยลดปริมาณน้ำฝนที่จะเข้าสู่ระบบระบายน้ำไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย และการนำน้ำฝนที่สามารถกักเก็บได้ไปใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปา ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำเสียรวม (Combined sewage) ได้ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แนวทางการคำนวณปริมาณน้ำเสียที่ลดได้จากระบบกักเก็บน้ำฝน

จากรูปที่ 3.3 A. แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณน้ำเสียของกรณีไม่มีระบบกักเก็บน้ำฝน เมื่อมีปริมาณน้ำฝน 120 หน่วยและมีอัตราการใช้น้ำประปา 100 หน่วย เกิดเป็นน้ำเสียจากปริมาณน้ำฝน 120 หน่วย และน้ำเสียจากการใช้น้ำประปา 80 หน่วย ดังนั้นจะมีปริมาณน้ำเสียเกิดขึ้นรวม 200 หน่วย และเมื่อเปรียบเทียบกับ B. ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณน้ำเสียเมื่อมีระบบกักเก็บน้ำฝนขนาดความจุ 120 หน่วย ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา 120 หน่วยจะถูกกักเก็บไว้แล้วนำไปใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปา 100 หน่วย และน้ำฝนส่วนที่เหลืออีก 20 หน่วยจะถูกกักเก็บไว้ในถัง ส่งผลให้การพิจารณาปริมาณการเกิดน้ำเสียครอบคลุมการใช้น้ำประปาจากน้ำฝนทดแทนน้ำประปา เพราะฉะนั้น ปริมาณน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดจะมีเพียง 80 หน่วยเท่านั้น และเมื่อเปรียบเทียบกับ A. และ B. การมีระบบกักเก็บน้ำฝนสามารถลดปริมาณน้ำเสียได้ 120 หน่วยซึ่งเท่ากับปริมาณน้ำฝนที่สามารถกักเก็บไว้ได้ ดังนั้นปริมาณน้ำเสียที่ลดได้สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ 3.2

$$\text{ถ้า } V_n \geq B_{n-1}; V_n = B_{n-1}$$

$$S = \sum_{n=1}^N V_n$$

สมการที่ 3.2

โดยที่

- S คือ ปริมาณน้ำเสียที่ลดได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)
 V คือ ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่หลังคา (ลูกบาศก์เมตร/วัน)
 B คือ ความจุคงเหลือในถังเก็บน้ำฝน (ลูกบาศก์เมตร/วัน)
 n คือ วันที่สนใจ

คำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการใช้ระบบกักเก็บน้ำฝนโดยใช้ความเข้มข้นของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสีย จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) ในการคำนวณ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3

$$C_N = (C_W W) + (C_S S)$$

สมการที่ 3.3

โดยที่

- C_N คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้สุทธิ (ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี)
 C_W คือ ความเข้มข้นก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปา (ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/ลูกบาศก์เมตร)
 W คือ ปริมาณน้ำประปาที่ลดได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)
 C_S คือ ความเข้มข้นก๊าซเรือนกระจกจากการบำบัดน้ำเสีย (ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/ลูกบาศก์เมตร)
 S คือ ปริมาณน้ำเสียที่ลดได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของระบบกักเก็บน้ำฝนประกอบด้วยต้นทุนในการก่อสร้างระบบ (ค่าถังเก็บน้ำและระบบกรองน้ำฝน) ต้นทุนในการบำรุงรักษาระบบ (การเปลี่ยนเครื่องกรองน้ำสารกรอง และไส้กรอง) และผลประโยชน์จากการลดปริมาณการใช้น้ำประปา (ราคาขายเหมาน้ำประปาจากการประปานครหลวง 13 บาท/ลูกบาศก์เมตร) โดยทั้งต้นทุนและผลประโยชน์จะถูกนำมาคำนวณเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) กำหนดอัตราคิดลด (Discount

rate) ร้อยละ 2 ตามอัตราเงินเฟ้อย้อนหลังเฉลี่ย 10 ปีจากธนาคารแห่งประเทศไทย และอายุการใช้ งานโครงการ 50ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

สมการที่ 3.4

โดยที่

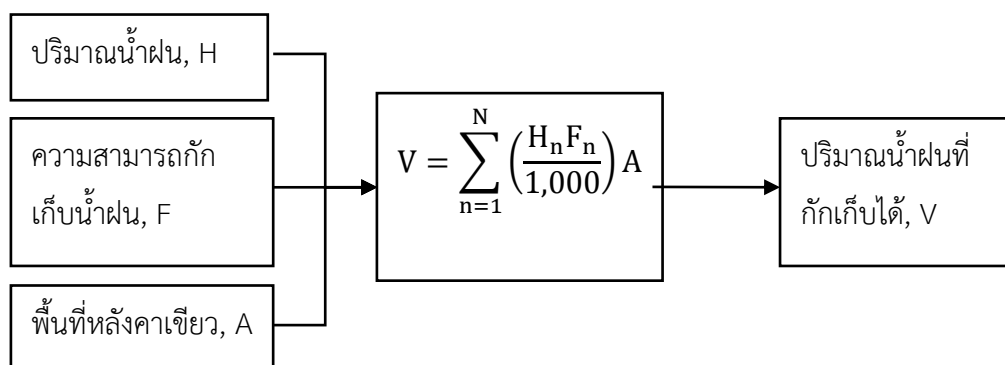
NPV	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)
C_0	คือ เงินลงทุนในโครงการ (บาท)
C_t	คือ กระแสเงินสดสุทธิในแต่ละปี (บาท)
r	คือ อัตราคิดลด (ร้อยละ)
t	คือ ระยะเวลา

3.3.2 หลังคาเขียว

การประเมินศักยภาพของหลังคาเขียวประกอบด้วย การประเมินด้านความสามารถในการช่วย บริหารจัดการน้ำและความสามารถในการช่วยประหยัดพลังงานในอาคาร

3.3.2.1 การจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว

ศึกษาการจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว โดยการคำนวณปริมาณน้ำฝนที่หลังคาเขียวสามารถกัก เก็บไว้ได้ โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยา เป็นน้ำฝนสะสมรายวันระยะเวลา 10 ปี ย้อนหลัง และใช้ข้อมูลพื้นที่หลังคาที่รับน้ำของอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยเป็นกรณีศึกษา โดยมีแนวทางการคำนวณ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แนวทางการคำนวณการจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว

$$V = \sum_{n=1}^N \left(\frac{H_n F_n}{1,000} \right) A$$

สมการที่ 3.5

โดยที่

V คือ ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)

H คือ ปริมาณน้ำฝนสะสม (มิลลิเมตร/วัน)

F คือ ความสามารถในการกักเก็บน้ำฝน (ร้อยละ)

A คือ พื้นที่หลังคา (ตารางเมตร)

n คือ วันที่มีฝนตก

สำหรับค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียวในงานวิจัยนี้ จะอ้างอิงจากผลการศึกษาของ Zhang, Q. และคณะ (2015) โดยค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ปริมาณน้ำฝนสะสมรายวัน (มิลลิเมตร)	ความสามารถในการกักเก็บน้ำฝน (ร้อยละ)
0.1 – 1.0	100.0
1.1 – 10	93.9
10.0 – 24.9	72.4
25.0 – 49.9	67.4
มากกว่า 50	38.8

จากนั้นนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้มาคำนวณเป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่สามารถลดได้จากการลดปริมาณน้ำเสียที่ต้องเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.6

$$C_R = C_S V$$

สมการที่ 3.6

โดยที่

 C_R คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี) C_S คือ ความเข้มของก๊าซเรือนกระจกจากการบำบัดน้ำเสีย (ตันเทียบเท่า

คาร์บอนไดออกไซด์/ลูกบาศก์เมตร)

V คือ ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)

จากการที่หลังคาเขียวต้องการใช้น้ำประปาในการรดน้ำต้นไม้โดยกำหนดให้อัตราการใช้น้ำประปาในการรดน้ำต้นไม้ คือ 1.7 ลิตร/ตารางเมตร/วัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2536) และในการคำนวณมีเงื่อนไขว่าถ้าหากวันที่มีปริมาณฝนตกถึงความต้องการน้ำแล้วจะไม่มี การรดน้ำต้นไม้ในวันนั้น โดยที่ปริมาณฝนที่ตกลงหลังคาสามารถคำนวณดังสมการที่ 3.1 และปริมาณความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้ของหลังคาเขียวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.7

$$G = \frac{1.7A}{1,000}$$

สมการที่ 3.7

โดยที่

G คือ ปริมาณความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้ของหลังคาเขียว (ลูกบาศก์เมตร/วัน)

A คือ พื้นที่หลังคาเขียว (ตารางเมตร)

เมื่อได้ปริมาณน้ำประปาที่ใช้สำหรับรดน้ำหลังคาเขียวแล้วนำมาคำนวณเป็นปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปาได้ดังสมการที่ 3.8

$$C_p = C_w W$$

สมการที่ 3.8

โดยที่

C_p คือ ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี)

C_w คือ ความเข้มของก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปา (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/ลูกบาศก์เมตร)

W คือ ปริมาณน้ำประปาที่ใช้สำหรับรดน้ำหลังคาเขียว (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)

ดังนั้นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากหลังคาเขียวในด้านการจัดการน้ำสุทธิ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.9

$$C_T = C_R - C_p$$

สมการที่ 3.9

โดยที่

C_T คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้สุทธิ (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี)

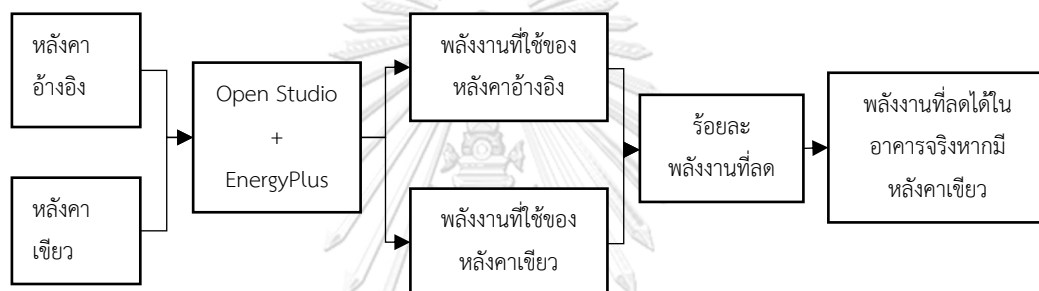
C_R คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี)

C_p คือ ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี)

ทางเลือกหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำเป็นประยุคต์นำหลังคาเขียวมาใช้ร่วมกับระบบกักเก็บน้ำฝนโดยที่มีแนวคิดในการคำนวณคือ ปริมาณน้ำฝนส่วนเกินจากการกักเก็บน้ำของหลังคาเขียวจะถูกรวบรวมและเก็บไว้ที่ถังเก็บน้ำฝนเพื่อนำกลับมาใช้รดน้ำบนหลังคาเขียวอีกครั้งหนึ่งในวันที่ปริมาณน้ำฝนที่ตกไม่เป็นไปตามความต้องการน้ำของหลังคาเขียว

3.3.2.2 การประหยัดพลังงานจากหลังคาเขียว

ศึกษาศักยภาพในการช่วยประหยัดพลังงานภายในอาคารจากหลังคาเขียวด้วยโปรแกรมประยุกต์ Open Studio และคำนวณโดยอาศัยฐานข้อมูล Energy Plus V.8.9.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและมีความน่าเชื่อถือในการจำลองการใช้พลังงานของอาคาร (Building simulation)



รูปที่ 3.5 แนวทางการประเมินการอนุรักษ์พลังงานจากหลังคาเขียว

ศึกษาศักยภาพในการช่วยประหยัดพลังงานจากหลังคาเขียวโดยการจำลองการใช้พลังงานของอาคารในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทั้งในกรณีที่ไม่ติดตั้งหลังคาเขียว (กรณี อ่างอิง) และในกรณีมีการติดตั้งหลังคาเขียว เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของทั้งสองกรณีเพื่อให้ได้สัดส่วนพลังงานที่ลดได้จากการติดตั้งหลังคาเขียว จากนั้นนำสัดส่วนพลังงานที่ลดได้ ไปคำนวณกับการใช้พลังงานจริงของอาคารดังกล่าวเพื่อให้ได้ปริมาณการใช้พลังงานที่สามารถลดได้จากการติดตั้งหลังคาเขียวที่อาคารจริง และสามารถคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการช่วยประหยัดพลังงานของหลังคาเขียวได้

สัดส่วนค่าพลังงานที่ลดได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.10

$$E_R = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100$$

สมการที่ 3.10

โดยที่

E_R คือ สัดส่วนพลังงานที่ลดได้ (ร้อยละ)

E_0 คือ อัตราการใช้พลังงานจำลองในระบบปรับอากาศของกรณีอ้างอิง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

E_1 คือ อัตราการใช้พลังงานจำลองในระบบปรับอากาศของกรณีติดตั้งหลังคาเขียว (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

พลังงานที่ลดได้จากการติดตั้งหลังคาเขียวที่อาคารจริงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11

$$E_B = E_R E_A$$

สมการที่ 3.11

โดยที่

E_B คือ พลังงานที่ลดได้เมื่อติดตั้งหลังคาเขียวของอาคารจริง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

E_R คือ สัดส่วนพลังงานที่ลดได้ (ร้อยละ)

E_A คือ พลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศของหลังคาจริง (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี)

พลังงานที่ลดได้สามารถคำนวณเป็นก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากสมการที่ 3.12

$$C = C_E E$$

สมการที่ 3.12

โดยที่

C คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์)

C_E คือ ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า (ต้นเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

E คือ พลังงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวประกอบด้วยต้นทุนในการก่อสร้าง ต้นทุนในการบำรุงรักษาระบบ และผลประโยชน์จากการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า (อัตราค่าไฟฟ้า 4 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง) โดยทั้งต้นทุนและผลประโยชน์จะถูกลำนำาคำนวณเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีอัตราคิดลด (Discount rate) ร้อยละ 2 และมีอายุการใช้งานโครงการ 50ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

3.3.3 คอนกรีตพูน

ศึกษาความสามารถในการลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำด้วยคอนกรีตพูนโดยใช้ข้อมูลปริมาณฝนกรมอุตุนิยมวิทยา เป็นระยะเวลา 10 ปีย้อนหลัง เลือกใช้วัสดุปูพื้นด้วยบล็อกคอนกรีตพูน ตราช่าง รุ่น Porous สามารถรับน้ำหนักได้ประมาณ 200 – 250 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ขนาด 10 x 20 x 6 ซม. อัตราการซึมผ่านของน้ำ 15 ลิตร/นาที่/ตารางเมตร และปริมาณการใช้ 50 ก้อน/ตารางเมตร ก้อนละ 9.63 บาท (ราคา ณ วันที่ 24 กันยายน 2560) โดยมีเงื่อนไขการคำนวณความสามารถในการลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำด้วยคอนกรีตพูนดังนี้

กรณีที่ 1 ถ้าคอนกรีตพูนมีอัตราการซึมผ่านของน้ำมากกว่าความเข้มฝนแล้วปริมาณน้ำฝนที่คอนกรีตพูนช่วยระบายได้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.13

$$\text{ถ้า } K > I; V = \frac{ITA}{1,000}$$

สมการที่ 3.13

โดยที่

- V คือ ปริมาณน้ำฝนที่ระบายได้ (ลูกบาศก์เมตร)
- I คือ ความเข้มฝน (ลิตร/นาที่/ตารางเมตร)
- K คือ อัตราการซึมผ่านของคอนกรีตพูน (ลิตร/นาที่/ตารางเมตร)
- T คือ ระยะเวลาที่ฝนตก (นาที่)
- A คือ พื้นที่คอนกรีตพูน (ตารางเมตร)

กรณีที่ 2 ถ้าคอนกรีตพูนมีอัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าความเข้มฝนแล้วปริมาณน้ำฝนที่คอนกรีตพูนช่วยระบายได้สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.14

$$\text{ถ้า } K < I; V = \frac{KTA}{1,000}$$

สมการที่ 3.14

โดยที่

- V คือ ปริมาณน้ำฝนที่ระบายได้ (ลูกบาศก์เมตร)
- I คือ ความเข้มฝน (ลิตร/นาที่/ตารางเมตร)
- K คือ อัตราการซึมผ่านของคอนกรีตพูน (ลิตร/นาที่/ตารางเมตร)
- T คือ ระยะเวลาที่ฝนตก (นาที่)
- A คือ พื้นที่คอนกรีตพูน (ตารางเมตร)

ปริมาณน้ำเสียที่ลดได้จากการกักเก็บน้ำฝนซึ่งจะช่วยลดปริมาณน้ำฝนที่จะไหลบ่าเข้าสู่ระบบระบายน้ำไปยังระบบบำบัดน้ำเสีย โดยสามารถคำนวณปริมาณน้ำเสียที่ลดได้ดังสมการที่ 3.15

$$S = \sum_{n=1}^N V_n$$

สมการที่ 3.15

โดยที่

S คือ ปริมาณน้ำเสียที่ลดได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)

V คือ อัตราการกักเก็บน้ำฝน (ลูกบาศก์เมตร)

n คือ วันที่สนใจ

คำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากปริมาณน้ำเสียที่ลดได้โดยใช้ความเข้มข้นของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการบำบัดน้ำเสียในการคำนวณ โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$C_T = C_S S$$

สมการที่ 3.16

โดยที่

C_T คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/10ปี)

C_S คือ ความเข้มข้นก๊าซเรือนกระจกจากการบำบัดน้ำเสีย(ตันเทียบเท่า

คาร์บอนไดออกไซด์/ลูกบาศก์เมตร)

S คือ ปริมาณน้ำเสียที่ลดได้ (ลูกบาศก์เมตร/10ปี)

ทางเลือกคอนกรีตพูนแบบมีถังเก็บน้ำเป็นการประยุกต์นำคอนกรีตพูนมาใช้ร่วมกับระบบกักเก็บน้ำฝนโดยที่มีแนวคิดในการคำนวณคือ ปริมาณน้ำฝนที่ซึมผ่านคอนกรีตพูนจะถูกรวบรวมและเก็บไว้ที่ถังเก็บน้ำฝนใต้ดินเพื่อนำกลับมาใช้รดน้ำพื้นที่สีเขียวบริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ในวันที่ปริมาณน้ำฝนที่ตกไม่เป็นไปตามความต้องการน้ำของพื้นที่สีเขียว

การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของคอนกรีตประกอบด้วยต้นทุนในการก่อสร้าง ต้นทุนในการบำรุงรักษาระบบ และผลประโยชน์จากการนำน้ำประปาที่กักเก็บได้ไปใช้ประโยชน์ในการรดน้ำต้นไม้ (อัตราค่าน้ำประปา 13 บาท/ลูกบาศก์เมตร) โดยทั้งต้นทุนและผลประโยชน์จะถูกนำมาคำนวณเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) มีอัตราคิดลด (Discount rate) ร้อยละ 2 และมีอายุการใช้งานโครงการ 50ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4

3.4 เปรียบเทียบความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมของทางเลือกการพัฒนา โครงสร้างพื้นฐานสีเขียว

จัดทำ Abatement cost เปรียบเทียบความคุ้มค่า (Cost effectiveness) ของการลดปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่ท่อระบายน้ำและความคุ้มค่าของการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในแต่ละแนวทาง ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว และคอนกรีตพรุน เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในระยะเวลาโครงการ 50 ปี ที่มีความคุ้มค่ามากที่สุดในพื้นที่กรณีศึกษา

ในการจัดทำ Abatement cost จะใช้ตัวเลือกการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวแต่ละแนวทางที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกและสามารถลดปริมาณน้ำฝนที่จะเข้าสู่ท่อระบายน้ำได้มากที่สุด หรือหากในทุกตัวเลือกมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบแล้วจะใช้ตัวเลือกที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่ำที่สุด

ความคุ้มค่าของการลดปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่ท่อระบายน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.17

$$\eta_v = \frac{NPV}{V}$$

สมการที่ 3.17

โดยที่

η_v คือ ความคุ้มค่า (บาท/ลูกบาศก์เมตร)

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)

V คือ ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บหรือระบายได้ (ลูกบาศก์เมตร)

ความคุ้มค่าของการลดปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่ท่อระบายน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.18

$$\eta_c = \frac{NPV}{C}$$

สมการที่ 3.18

โดยที่

- η_c คือ ความคุ้มค่า (บาท/ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์)
- NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)
- C คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์)



บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย

การประเมินศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพในการลดปริมาณน้ำฝนที่ลงสู่ท่อระบายน้ำ การอนุรักษ์พลังงาน ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ และความคุ้มค่าจากการประยุกต์ใช้โครงสร้างพื้นฐานสีเขียวของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแบ่งโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวออกเป็น 3 ทางเลือก ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว และคอนกรีตพรุน

4.1 สถิติปริมาณน้ำฝน

4.1.1 ที่มาและวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำฝน

ข้อมูลสถิติปริมาณฝนตกสะสมในพื้นที่กรุงเทพมหานครย้อนหลัง 10 ปี ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2551-2560 เป็นข้อมูลที่ได้รับจากกรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณฝนสะสมรายเดือนในช่วง 10 ปี ย้อนหลังมีค่า 163.8 มิลลิเมตร โดยที่ระหว่างเดือนพฤษภาคม-ตุลาคมจะเป็นช่วงที่กรุงเทพฯมีปริมาณฝนสะสมสูงกว่าค่าเฉลี่ยโดยมีปริมาณฝนสะสมสูงสุดในเดือนกันยายน ขณะที่ระหว่างเดือนพฤศจิกายน-เมษายนเป็นช่วงที่มีปริมาณฝนสะสมต่ำกว่าค่าเฉลี่ยโดยมีปริมาณฝนสะสมต่ำสุดในเดือนธันวาคม ข้อมูลสถิติปริมาณน้ำฝนสะสมรายเดือนในช่วงระยะเวลา 10 ปีย้อนหลัง แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สถิติปริมาณน้ำฝนสะสมรายเดือนในช่วงระยะเวลา 10 ปีย้อนหลัง

เดือน	ปีตรวจวัด										เฉลี่ย
	2551	2552	2553	2554	2555	2556	2557	2558	2559	2560	
ม.ค.	62.1	0.0	99.9	0.2	44.2	41.2	0.0	3.5	72.6	45.1	36.9
ก.พ.	69.3	0.0	2.9	21.8	64.9	7.4	2.1	16.8	0.0	0.0	18.5
มี.ค.	3.6	30.2	14.6	173.3	24.1	38.0	39.6	183.9	54.1	44.0	60.5
เม.ย.	180.8	359.6	17.3	131.6	56.1	89.9	7.8	128.9	31.1	75.7	107.9
พ.ค.	257.9	463.4	279.3	299.6	121.9	149.2	73.7	82.5	100.2	481.8	231.0
มิ.ย.	159.9	219.1	191.2	257.4	134.8	175.6	171.1	459.0	465.8	228.8	246.3
ก.ค.	225.5	173.0	356.3	454.5	196.4	199.8	100.7	217.2	162.7	319.6	240.6
ส.ค.	171.9	352.9	343.2	314.6	186.5	221.7	276.0	52.6	348.8	370.7	263.9
ก.ย.	330.1	306.9	409.5	223.6	594.7	376.3	188.0	353.9	355.5	445.8	358.4
ต.ค.	376.5	313.1	256.3	362.0	207.7	392.3	211.2	304.6	294.3	561.3	327.9
พ.ย.	64.8	46.5	30.6	0.9	88.9	79.9	22.2	64.5	121.7	45.6	56.6
ธ.ค.	0.0	7.3	22.7	0.7	8.1	1.6	31.0	42.7	0.0	52.5	16.7
รวม	1,902.4	2,272.0	2,023.8	2,240.2	1,728.3	1,772.9	1,123.4	1,910.1	2,006.8	2,670.9	1,965.1

หน่วย: มิลลิเมตร

4.1.2 แนวทางการจัดการน้ำฝนเพื่อให้เกิดประโยชน์

การจัดการน้ำฝนเป็นสิ่งที่จำเป็นโดยเฉพาะในพื้นที่ชุมชนเมืองต้องได้รับความสนใจและร่วมมือกันจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เพราะหากไม่ได้รับการบริหารจัดการที่ดีแล้วจะเกิดผลกระทบต่อชุมชนเมืองอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งในด้านสังคม เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อม ปัญหาที่สะท้อนที่สะท้อนถึงความล้มเหลวในการจัดการน้ำฝนของเมืองได้ก็คือ ปัญหาน้ำท่วม

สำหรับแนวทางในการจัดการน้ำฝนเพื่อให้เกิดประโยชน์แบ่งออกเป็น การนำน้ำฝนกลับมาใช้ใหม่ในระบบกักเก็บน้ำฝนและคอนกรีตพูน และการจัดการน้ำร่วมกับการอนุรักษ์พลังงาน (Co-benefit) ด้วยหลังคาเขียว

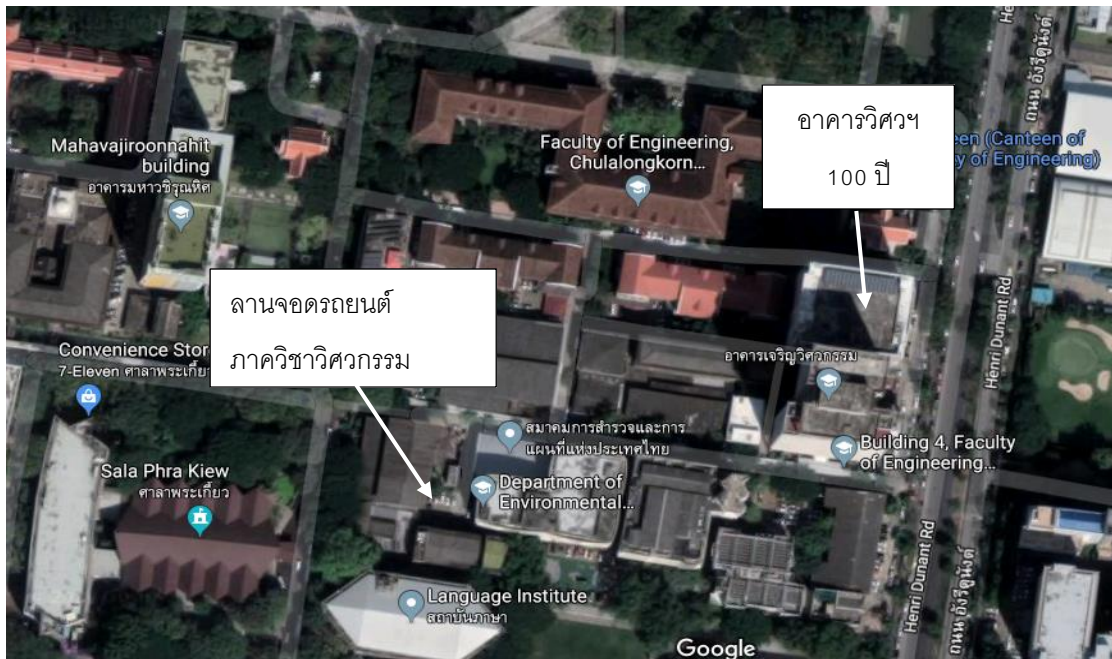
4.2 กายภาพของพื้นที่กรณีศึกษา

4.2.1 คัดเลือกพื้นที่ตัวอย่างในคณะวิศวกรรมศาสตร์

จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลพบว่าภายในพื้นที่กรณีศึกษาประกอบด้วยอาคารจำนวน 31 อาคาร โดยมีอาคารหลักๆ ได้แก่ อาคารวิศวกรรมศาสตร์ 1-5 อาคารฮันส์ บันตลี อาคารเจริญวิศวกรรม อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธาและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาคารภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี และวิศวกรรมสถาน อาคารสลั ลดาวัลย์ และอาคารวิศวะฯ 100 ปี แต่ทั้งนี้เนื่องจากหลายอาคารเป็นอาคารเก่า มีการติดตั้งมิเตอร์น้ำประปาพร้อมหลายอาคาร และบางอาคารไม่มีการเก็บบันทึกข้อมูลที่เป็นในการวิจัย ดังนั้นจึงเลือกอาคารวิศวะฯ 100 ปี ซึ่งเป็นอาคารใหม่ที่มีการเก็บบันทึกข้อมูลที่ต้องการมาเป็นอาคารสำหรับประเมินหลังคาเขียวและระบบกักเก็บน้ำฝน และเลือกลานจอดรถยนต์บริเวณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมสำหรับประเมินคอนกรีตพูน ข้อมูลกายภาพของพื้นที่ที่ได้รับการคัดเลือกแสดงดังตารางที่ 4.2 และตำแหน่งที่ตั้งแสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 กายภาพของพื้นที่ตัวอย่าง

พื้นที่	ลักษณะ	ขนาดพื้นที่
อาคารวิศวะฯ 100 ปี	หลังคาคอนกรีต มีลักษณะเรียบแบน	1,542 ตารางเมตร
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลานจอดรถยนต์คอนกรีต	200 ตารางเมตร



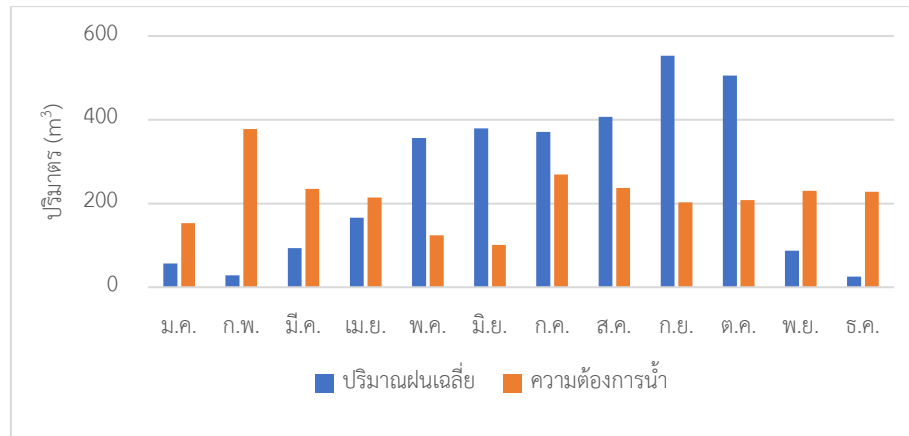
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งที่ตั้งพื้นที่ตัวอย่าง

4.3 การนำน้ำฝนกลับมาใช้ใหม่

4.3.1 ระบบกักเก็บน้ำฝน

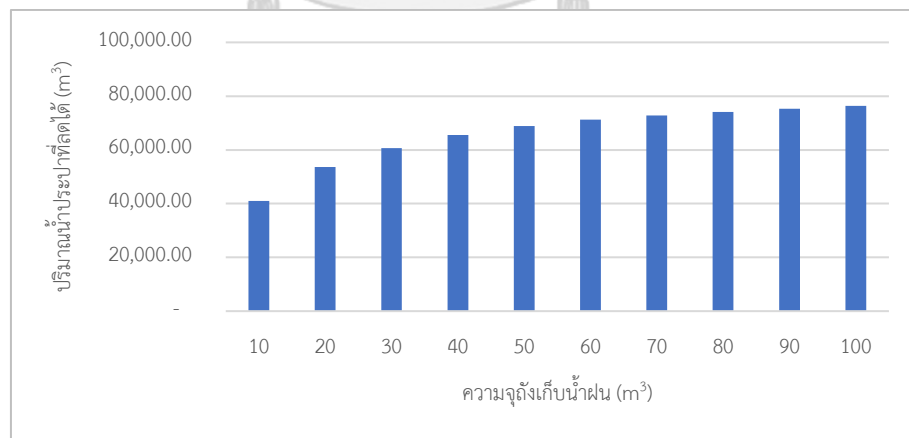
การประเมินศักยภาพของระบบกักเก็บน้ำฝนเป็นการประเมินศักยภาพในการประหยัดน้ำด้วยการเก็บน้ำฝนไว้ใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปา ลดปริมาณน้ำเสียที่จะเกิดขึ้นแล้วต้องนำไปบำบัดและประเมินศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจก

พิจารณาปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบนพื้นที่หลังคาจับน้ำอาคารวิศวกรรม 100 ปี เฉลี่ยรายเดือนและปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนของอาคารวิศวกรรม 100 ปี พบว่าในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายนจะมีปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่พื้นที่หลังคาจับน้ำของอาคารไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำ ขณะที่ช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมจะมีปริมาณน้ำฝนเพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำ และเมื่อเปรียบเทียบผลรวมของปริมาณน้ำฝนและปริมาณความต้องการน้ำ พบว่ามีปริมาณน้ำฝนที่ตกลงสู่หลังคาอาคารทั้งปีมากกว่าปริมาณความต้องการน้ำเสียอีก ดังนั้นหากความจุถังเก็บน้ำมีขนาดใหญ่พอที่จะเก็บน้ำไว้ได้โดยที่น้ำไม่มีวันเต็มถัง ก็จะสามารถสำรองน้ำไว้เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำในช่วงแล้งได้ ปริมาณน้ำฝนตกลงสู่พื้นที่หลังคาและปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนของอาคารวิศวกรรม 100 ปี ดังรูปที่ 4.2



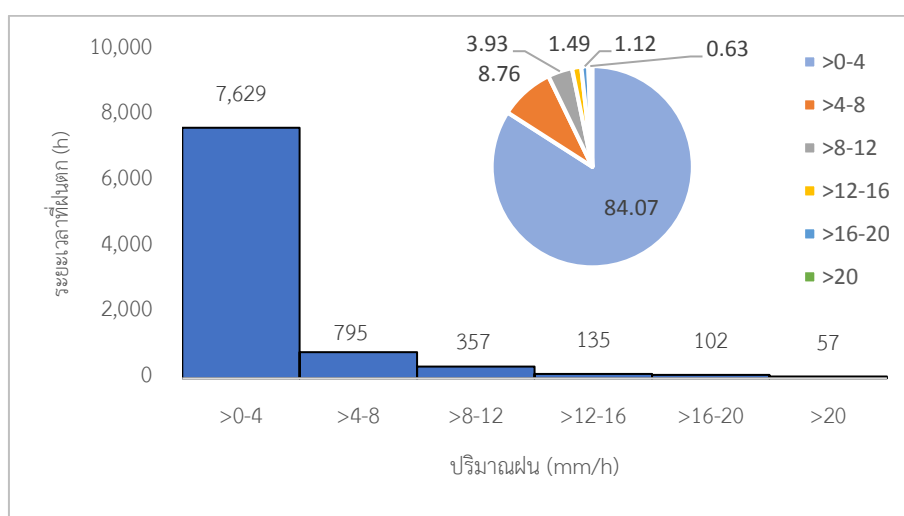
รูปที่ 4.2 ปริมาณฝนเฉลี่ยและความต้องการน้ำรายเดือนของอาคารวิศวะฯ 100ปี

เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำฝนและปริมาณความต้องการน้ำของอาคารวิศวะฯ 100ปี มาคำนวณตามแนวทางในรูปที่ 3.2 (ตัวอย่างการคำนวณตามภาคผนวก ข.) จะได้ปริมาณน้ำประปาที่สามารถลดได้จากระบบกักเก็บน้ำฝนเมื่อใช้ถังเก็บน้ำฝนที่มีความจุขนาดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณน้ำประปาที่สามารถลดได้เพิ่มขึ้นตามความจุของถังเก็บน้ำฝนโดยในเวลา 50ปี ถังเก็บน้ำฝนที่มีความจุตั้งแต่ 60 ลูกบาศก์เมตร ขึ้นไปจะเริ่มมีศักยภาพในการประหยัดน้ำประปาใกล้เคียงกันเนื่องจากถังเก็บน้ำฝนมีความจุที่เพียงพอต่อการเก็บน้ำฝนไว้ใช้ในช่วงที่ฝนไม่ตกติดต่อกันได้เป็นส่วนใหญ่แล้ว



รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำประปาที่ลดได้เมื่อใช้ถังเก็บน้ำฝนความจุต่างๆ

จากนั้นเพื่อออกแบบระบบกรองน้ำฝนจะต้องทราบถึงการกระจายตัวของฝนก่อนว่าปริมาณฝนที่ตกนั้นมีความเข้มข้น มีความถี่ที่ตกเป็นอย่างไร ซึ่งจากข้อมูลปริมาณฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยาแบบละเอียดที่สุดเก็บเป็นคาบ 3 ชั่วโมง ดังนั้นจึงสมมติให้ปริมาณฝนที่วัดได้มาจากการตกต่อเนื่อง 3 ชั่วโมง ซึ่งสามารถนำมาสร้างกราฟแสดงการกระจายตัวของฝน แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณฝนที่มีความถี่ในการตกสูงที่สุดคือปริมาณฝนไม่เกิน 4 มิลลิเมตร/ชั่วโมง โดยคิดเป็น ร้อยละ 84.07 ซึ่งมีความถี่ในการตกสะสม 7,629 ชั่วโมง ดังนั้นจึงเลือกปริมาณฝน 4 มิลลิเมตร/ชั่วโมงหรือเท่ากับฝนตกครั้งละ 12 มิลลิเมตรเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในการออกแบบระบบกรองน้ำฝน

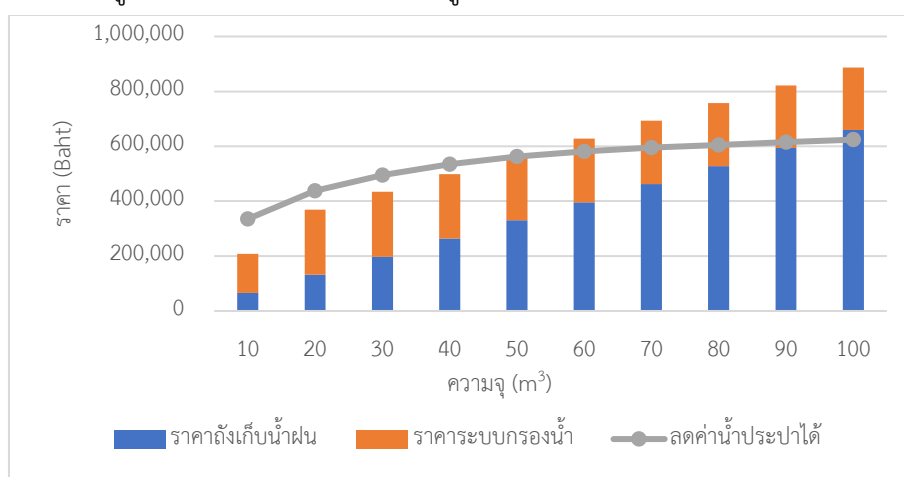


รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของฝนในพื้นที่กรณีศึกษา

ตัวอย่างการออกแบบระบบกรองน้ำฝน เมื่อปริมาณฝน 12 มิลลิเมตร ตกลงบนหลังคาอาคารวิศวะฯ 100ปี ซึ่งมีพื้นที่หลังคา 1,542 ตารางเมตร โดยฝนตกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ปริมาณน้ำฝน 18.5 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นต้องการระบบกรองน้ำฝนที่มีอัตราการกรอง 6.2 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง และจากคุณสมบัติของเครื่องกรองน้ำมีอัตราการกรองสูงสุด 1.5 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ดังนั้นต้องการเครื่องกรองน้ำจำนวน 5 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องมีอายุการใช้งาน 15 ปี จะประกอบด้วยไส้กรอง PP และสารกรองคาร์บอน เพื่อกรองฝุ่นละอองและดูดซับสี กลิ่น ที่เจือปนมากับน้ำฝน กำหนดเปลี่ยนไส้กรองและสารกรองทุกปี ปีละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 50 ปีตามอายุการใช้งานของระบบกักเก็บน้ำฝน

ในการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบกักเก็บน้ำฝนซึ่งประกอบด้วยต้นทุนจากถังเก็บน้ำฝน ต้นทุนระบบกรองน้ำฝน และมูลค่าจากน้ำประปาที่สามารถประหยัดได้ พบว่าต้นทุนของถังเก็บน้ำฝนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความจุเนื่องจากความจุที่มากขึ้นก็ต้องการปริมาณถังเก็บน้ำมากขึ้นเช่นกัน ต้นทุนของระบบกรองน้ำประกอบด้วยเครื่องกรองน้ำที่มีอายุการใช้งาน 15 ปี สารกรองคาร์บอนและไส้กรอง PP ที่เปลี่ยนทุกปี ปีละ 1 ครั้ง โดยแสดงผลรวมของต้นทุนที่เวลาเริ่มต้น มีอัตราการคิดลดร้อยละ

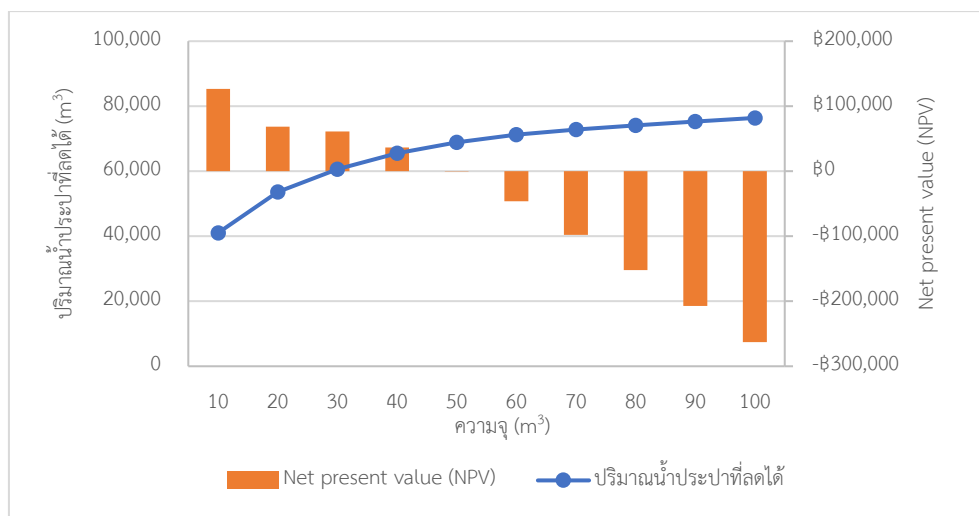
ละ 2 ขณะที่มูลค่าของน้ำประปาที่ลดได้เป็นผลรวมของค่าน้ำประปาที่สามารถประหยัดได้ โดยคำนวณจากอัตราค่าน้ำ 13 บาท/ลูกบาศก์เมตร และมีอัตราการคิดลดร้อยละ 2 เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนของระบบกักเก็บน้ำฝนและมูลค่าของน้ำประปาที่ลดได้พบว่าในกรณีของอาคารวิศวะฯ 100 ปี ระบบกักเก็บน้ำฝนที่มีความจุ 10 - 40 ลูกบาศก์เมตร มูลค่าของน้ำประปาที่ลดได้จะมีค่ามากกว่าต้นทุนของระบบกักเก็บน้ำฝน ขณะที่ความจุตั้งแต่ 50 ลูกบาศก์เมตรขึ้นไปจะมีค่าใช้จ่ายของระบบมากกว่ามูลค่าของน้ำประปาที่ลดได้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ต้นทุนของระบบกักเก็บน้ำฝนและมูลค่าของน้ำประปาที่ลดได้ในเวลา 50 ปี

หรือกล่าวได้ว่าที่ความจุช่วง 10 - 40 ลูกบาศก์เมตรจะเป็นช่วงที่ทำให้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก ขณะที่ความจุตั้งแต่ 50 ลูกบาศก์เมตรขึ้นไปเป็นช่วงที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบซึ่งหมายความว่าช่วงความจุถึงเก็บน้ำฝนดังกล่าวเป็นช่วงที่อาคารวิศวะฯ 100 ปี จะเริ่มขาดทุนทางเศรษฐศาสตร์ และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำประปาที่ลดได้พบว่าระบบกักเก็บน้ำฝนสามารถช่วยประหยัดน้ำได้มากขึ้นตามความจุ และเมื่อพิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิควบคู่กับปริมาณน้ำประปาที่ลดได้พบว่าที่ความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร เป็นความจุที่สามารถประหยัดน้ำได้มากที่สุดโดยที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิยังเป็นบวก ดังรูปที่ 4.6

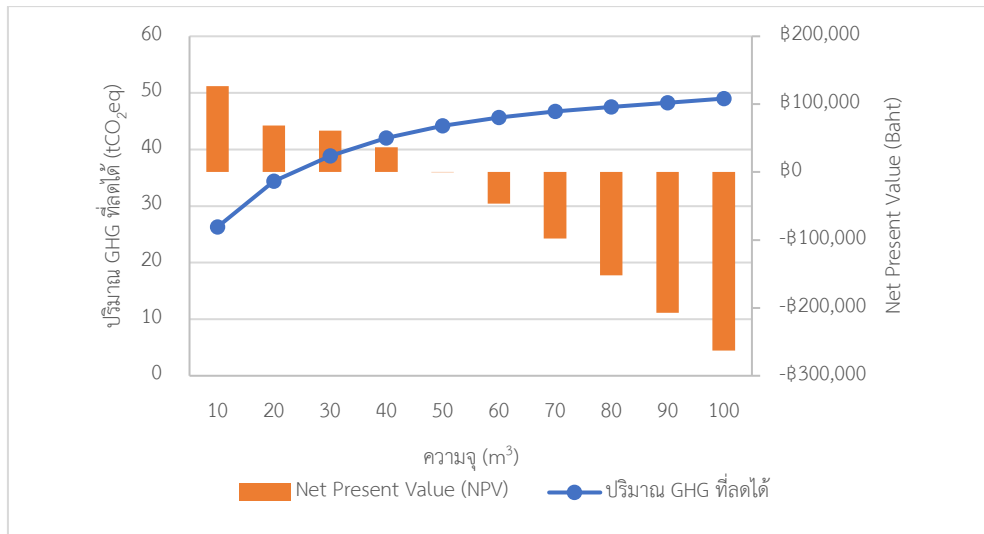
ทั้งนี้ผลการประเมินข้างต้นมาจากการคำนวณอัตราค่าน้ำประปาที่ 13 บาท/ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นหากในอนาคต อัตราค่าน้ำมีราคาสูงขึ้น จะส่งผลให้สามารถเลือกใช้ขนาดถังกักเก็บน้ำฝนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถช่วยประหยัดน้ำประปาได้มากขึ้นในขณะที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิยังคงเป็นบวก



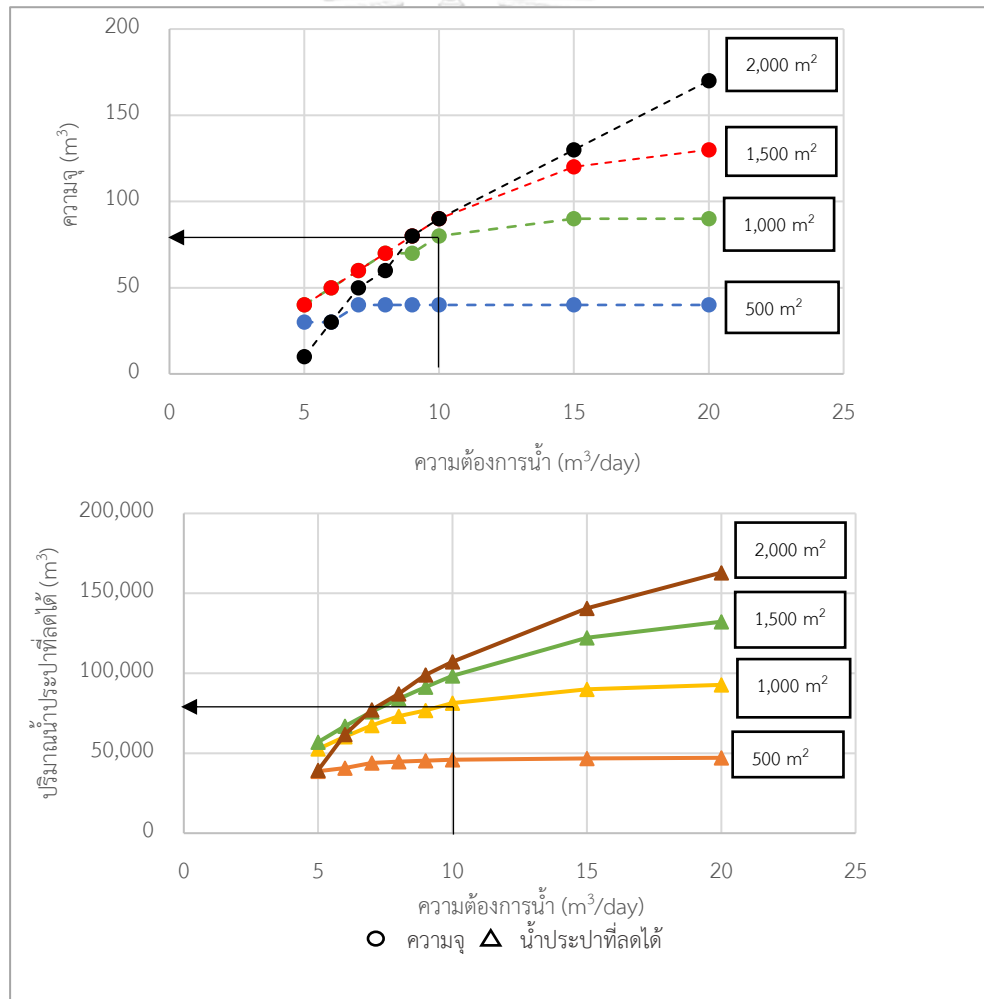
รูปที่ 4.6 มูลค่าปัจจุบันสุทธิกับปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้สัมพันธ์ความจุขนาดต่างๆ

เนื่องจากการผลิตน้ำประปาเป็นกิจกรรมหนึ่งที่เกิดก๊าซเรือนกระจกขึ้น ดังนั้นการนำน้ำฝนมาใช้ประโยชน์ทดแทนก็เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก โดยจากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. การผลิตน้ำประปา 1 ลูกบาศก์เมตร ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกขึ้น 5.08×10^{-4} ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด โดยจากฐานข้อมูลของ อบก. กิจกรรมการรวบรวมและการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียชุมชนของเมืองขนาดใหญ่ ปริมาณน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกขึ้น 1.33×10^{-4} ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ จากรูปที่ 4.7 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ผลิตได้สัมพันธ์กับความจุขนาดต่างๆ ของระบบกักเก็บน้ำฝนพบว่าในเวลา 50 ปี ที่ความจุถังเก็บน้ำฝนขนาด 40 ลูกบาศก์เมตรนั้นสามารถลดก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปาได้ 33.28 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ และลดก๊าซเรือนกระจกจากการลดปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัดได้ 8.72 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ รวมเป็น 42.00 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ผลิตได้มากที่สุดในขณะที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิยังเป็นบวก

เพื่อให้สามารถนำผลการศึกษาระบบกักเก็บน้ำฝนไปใช้ได้กับอาคารอื่นๆ ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ที่มีความต้องการน้ำและพื้นที่หลังคาบน้ำต่างกันจึงสรุปไว้ในรูปที่ 4.8 แสดงความจุที่ทำให้ลดปริมาณน้ำประปาได้สูงสุดโดยที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิยังเป็นบวกสัมพันธ์กับความต้องการน้ำและขนาดพื้นที่หลังคาบน้ำของอาคาร จากรูปที่ 4.8 หากอาคารที่สนใจติดตั้งระบบกักเก็บน้ำฝนเพื่อให้สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้สูงสุดมีพื้นที่หลังคาบน้ำ 1,000 ตารางเมตร และมีปริมาณความต้องการน้ำ 10 ลูกบาศก์เมตร/วัน ความจุของถังกักเก็บน้ำฝนที่แนะนำคือ 80 ลูกบาศก์เมตร และจะสามารถประหยัดน้ำประปาได้ประมาณ 80,000 ลูกบาศก์เมตร ในเวลา 50 ปี



รูปที่ 4.7 มูลค่าปัจจุบันสุทธิกับปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้สัมพันธ์กับความจุขนาดต่างๆ

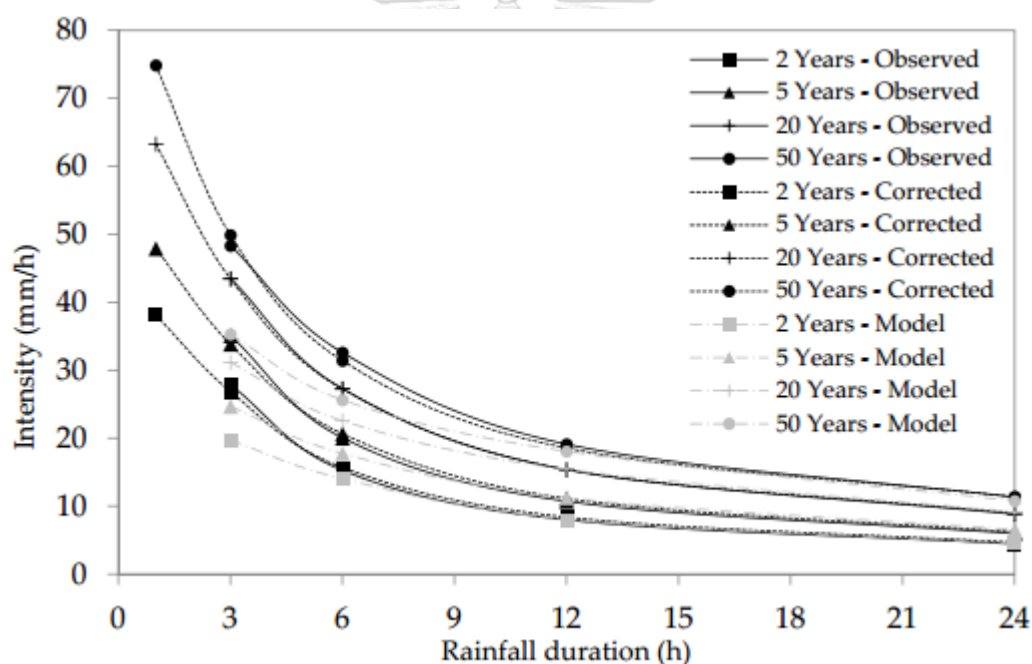


รูปที่ 4.8 ความจุที่ทำให้ลดปริมาณน้ำประปาได้สูงสุดโดยที่ NPV ยังเป็นบวกสัมพันธ์กับความต้องการน้ำและขนาดพื้นที่หลังคารับน้ำของอาคาร

4.3.2 คอนกรีตพูน

การประเมินศักยภาพของคอนกรีตพูนประกอบการประเมินศักยภาพในการลดปริมาณน้ำฝน ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการเก็บน้ำฝนบางส่วนนำไปรดน้ำต้นไม้ และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งและบำรุงรักษาคอนกรีตพูน

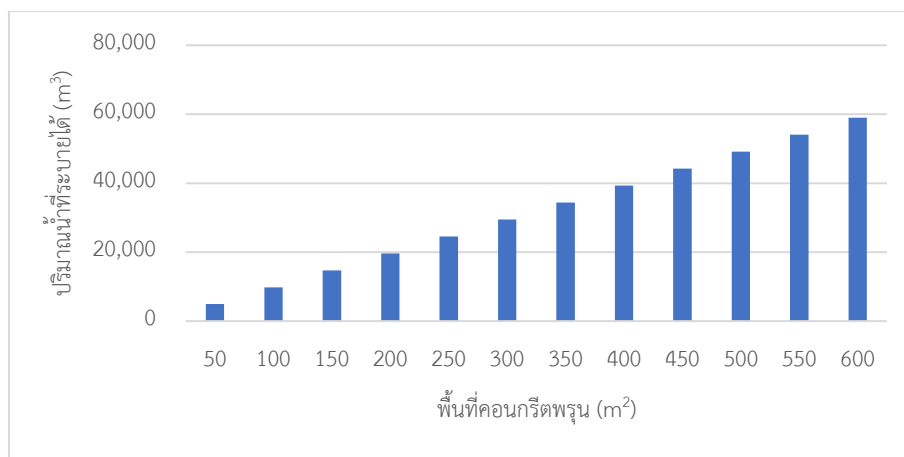
เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการซึมน้ำของคอนกรีตพูนที่ 15 ลิตร/นาที่/ตารางเมตรกับความเข้มฝนจาก รูปที่ 4.9 IDF curve ของพื้นที่กรุงเทพมหานคร (Shrestha, A. และคณะ, 2017) ที่ความเข้มฝนสูงสุด นั่นคือที่คาบการเกิดซ้ำ 50 ปี และระยะเวลาที่ฝนตก 1 ชั่วโมง คือความเข้มฝน 75 มิลลิเมตร/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 1.25 ลิตร/นาที่/ตารางเมตร พบว่าคอนกรีตพูนมีความสามารถในการซึมน้ำมากกว่าความเข้มฝน ดังนั้นปริมาณฝนที่ตกลงบนพื้นที่คอนกรีตพูนจึงสามารถซึมผ่านได้ทั้งหมด



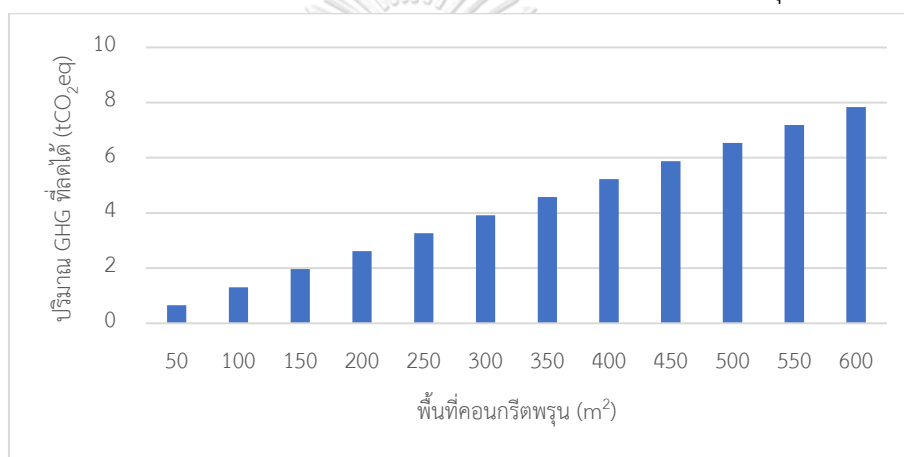
รูปที่ 4.9 IDF curve ของพื้นที่กรุงเทพมหานคร

ที่มา: (Shrestha, A. และคณะ, 2017)

จากการคำนวณศักยภาพในการระบายน้ำฝนของคอนกรีตพูนพบว่า จะสามารถระบายน้ำฝนได้มากขึ้นเมื่อมีพื้นที่ติดตั้งคอนกรีตพูนเพิ่มขึ้นโดยที่พื้นที่ลานจอดรถยนต์ภาคีวิศวะกรรมสิ่งแวดล้อมขนาด 200 ตารางเมตร ในระยะเวลา 50 ปี จะสามารถช่วยระบายน้ำฝนได้ 19,651 ลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นการลดปริมาณน้ำที่จะเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้ 2.61 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ ดังรูปที่ 4.11

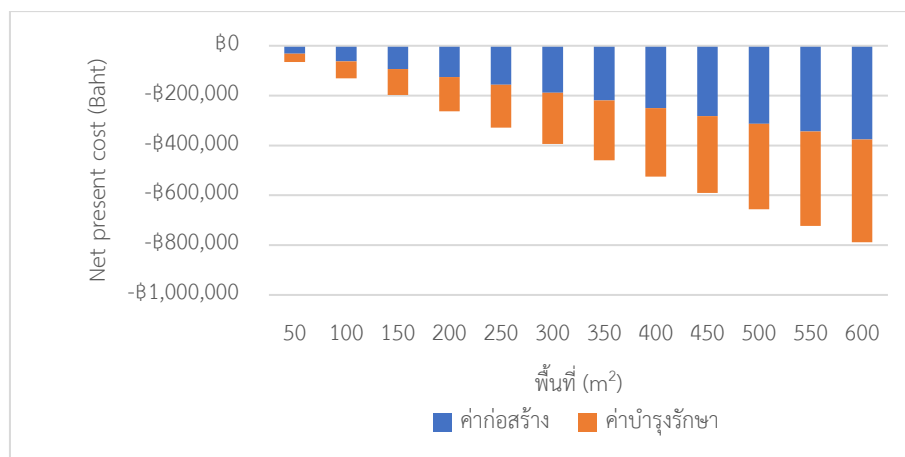


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำฝนที่ระบายนได้กับพื้นที่คอนกรีตพูนในเวลา 50 ปี

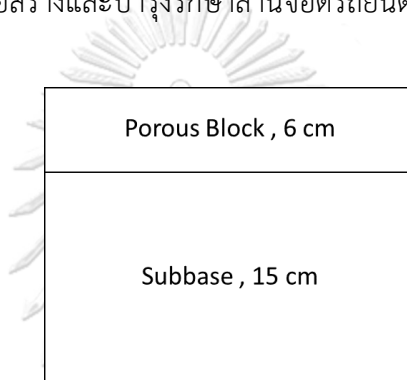


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้กับพื้นที่คอนกรีตพูนในเวลา 50 ปี

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูน พบว่าคอนกรีตพูนมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ประกอบด้วยค่าแรงรื้อถอนพื้น ค.ส.ล. 50 บาท/ตารางเมตร ค่าบล็อกพูน 481.5 บาท/ตารางเมตร ค่าแรงปูพื้น 50 บาท/ตารางเมตร และค่าหินกรวด 45 บาท/ตารางเมตร รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง 626.5 บาท/ตารางเมตร และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในเวลา 50 ปี ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาประจำปี 14.16 บาท/ตารางเมตรต่อปี และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาใหญ่ในปีที่ 30 เป็นเงินร้อยละ 70 ของมูลค่าก่อสร้าง ดังนั้นจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนในเวลา 50 ปี ที่อัตราคิดลดร้อยละ 2 รวมเป็นเงิน 687.04 บาท/ตารางเมตร ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนภาควิชาชีพวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมขนาด 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี จะมีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 262,708 บาท ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนขนาดพื้นที่ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและบำรุงรักษาลานจอดรถยนต์คอนกรีตพรุนพื้นที่ขนาดต่างๆ ในเวลา 50 ปี



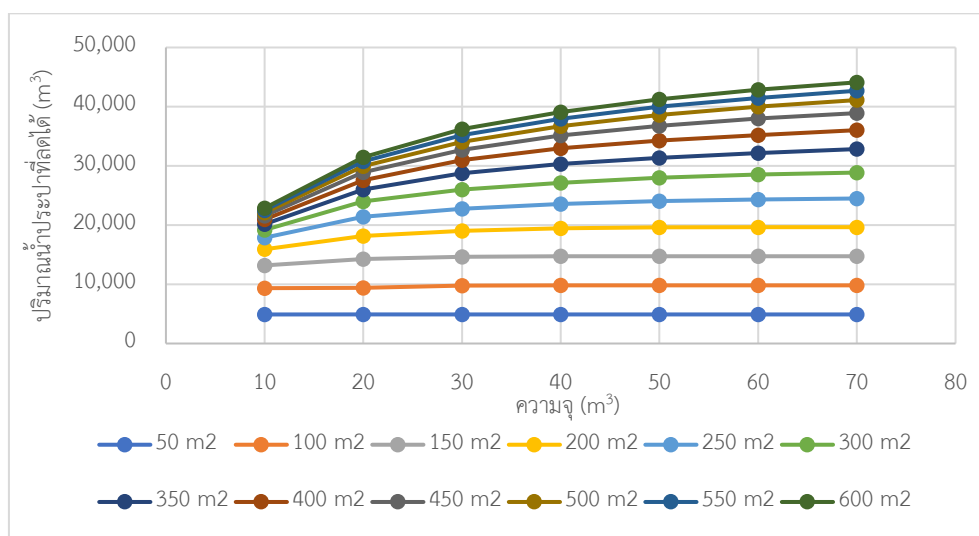
รูปที่ 4.13 รูปตัดขวางแสดงชั้นการปูคอนกรีตพรุน

4.3.2.1 ทางเลือกคอนกรีตพรุนแบบมีถังเก็บน้ำฝนใต้ดิน

กรณีที่คอนกรีตพรุนมีการติดตั้งถังเก็บน้ำใต้ดินไว้เพื่อกักเก็บน้ำฝนไว้ใช้ประโยชน์ในการรดน้ำต้นไม้ทดแทนการใช้น้ำประปา โดยที่ความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้คือ 1.7 ลิตร/ตารางเมตร/วัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2536) ซึ่งจากการลงพื้นที่เพื่อวัดขนาดพื้นที่สีเขียวซึ่งครอบคลุมพื้นที่ที่มีการปลูกพืชทั้งหมดของคณะวิศวกรรมศาสตร์พบว่าพื้นที่สีเขียวทั้งสิ้น 4,745.68 ตารางเมตร ดังนั้นความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้คือ 8.07 ลูกบาศก์เมตร/วัน และมีเงื่อนไขว่าถ้าหากวันใดที่มีปริมาณฝนตกถึงความต้องการน้ำแล้วจะไม่มี การรดน้ำต้นไม้ในวันนั้น

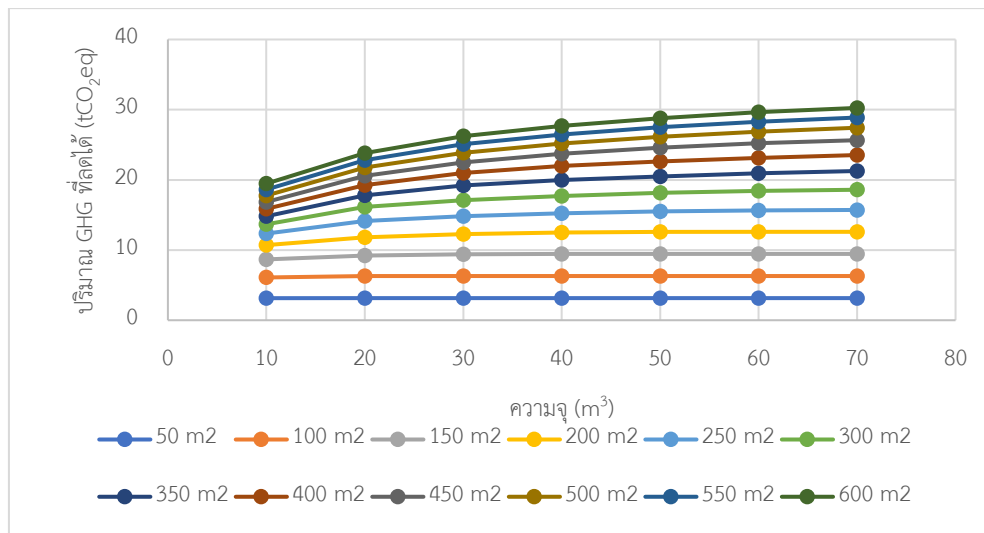
เมื่อติดตั้งถังเก็บน้ำใต้ดินให้กับคอนกรีตพรุน พบว่าการเพิ่มพื้นที่คอนกรีตพรุนมีแนวโน้มทำให้สามารถลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้มากขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่ในช่วงแรกจะส่งผลกระทบต่อศักยภาพในการช่วยประหยัดน้ำประปาได้มาก และศักยภาพในการประหยัดน้ำประปาจะเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อขนาดพื้นที่คอนกรีตพรุนมีขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณความจุถังเก็บน้ำพบว่า การเพิ่มปริมาณความจุถังเก็บน้ำในพื้นที่คอนกรีตพรุนขนาดเล็กนั้นจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการประหยัดน้ำประปาได้เล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณความจุถังเก็บน้ำในพื้นที่คอนกรีตขนาดใหญ่จะส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการลดการใช้น้ำประปาได้มากและจะเริ่มคงที่เมื่อความจุถังเก็บน้ำมี

ขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่คอนกรีตพูนเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำฝนที่จะสามารถไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำได้ และการเพิ่มความจุถังเก็บน้ำทำให้สามารถเก็บน้ำได้มากขึ้นซึ่งช่วยให้มีน้ำฝนสำหรับใช้รดน้ำต้นไม้ทดแทนน้ำประปาในช่วงที่ฝนไม่ตกติดต่อกันได้ยาวนานมากขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตรพบว่า ในเวลา 50 ปี สามารถช่วยลดการใช้น้ำประปาตั้งแต่ 15,921 ลูกบาศก์เมตร ที่ขนาดความจุถังเก็บน้ำ 10 ลูกบาศก์เมตร และเริ่มคงที่ตั้งแต่ความจุถังเก็บน้ำขนาด 40 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งช่วยลดการใช้น้ำประปาได้ 19,468 ลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4.13



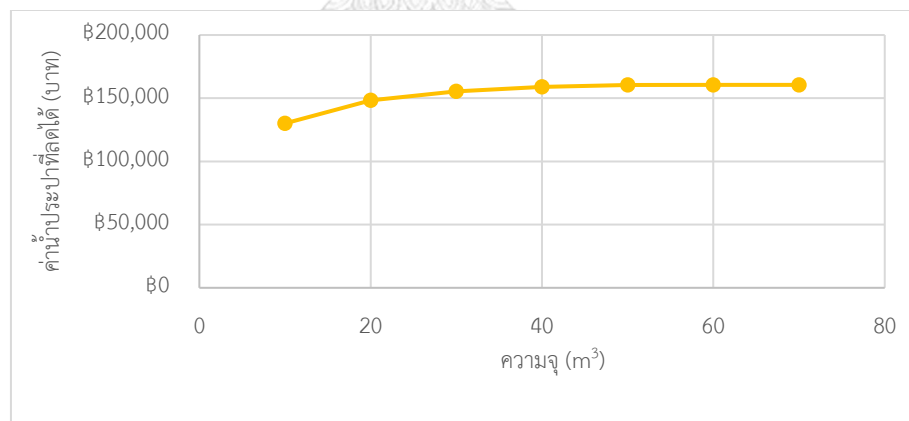
รูปที่ 4.14 ปริมาณน้ำประปาที่ลดได้จากการติดตั้งคอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำฝน

เมื่อพิจารณาศักยภาพในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก พบว่าการเพิ่มพื้นที่คอนกรีตพูนมีแนวโน้มทำให้สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่ในช่วงแรกจะส่งผลต่อศักยภาพในการช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้มาก และศักยภาพในลดก๊าซเรือนกระจกจะเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อขนาดพื้นที่คอนกรีตพูนมีขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณความจุถังเก็บน้ำพบว่า การเพิ่มปริมาณความจุถังเก็บน้ำในพื้นที่คอนกรีตพูนขนาดเล็กนั้นจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจกได้เล็กน้อย แต่การเพิ่มปริมาณความจุถังเก็บน้ำในพื้นที่คอนกรีตพูนขนาดใหญ่จะส่งผลให้เพิ่มความสามารถในการลดก๊าซเรือนกระจกได้มากและจะเริ่มคงที่เมื่อความจุถังเก็บน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.15 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการติดตั้งคอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำฝน

เมื่อพิจารณาเฉพาะลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากปริมาณน้ำประปาที่ลดได้สามารถคำนวณเป็นการลดค่าใช้จ่ายน้ำประปาที่ต้องใช้ในการรดน้ำต้นไม้เป็นเวลา 50 ปี โดยที่อัตราค่าน้ำ 13 บาท/ลูกบาศก์เมตร และมีอัตราคิดลดร้อยละ 2 แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าในเวลา 50 ปี สามารถช่วยค่าน้ำประปาตั้งแต่ 195,112 บาท ที่ขนาดความจุถังเก็บน้ำ 10 ลูกบาศก์เมตร และเริ่มคงที่ตั้งแต่ความจุถังเก็บน้ำขนาด 40 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งช่วยลดค่าน้ำประปาได้ 238,576 บาท

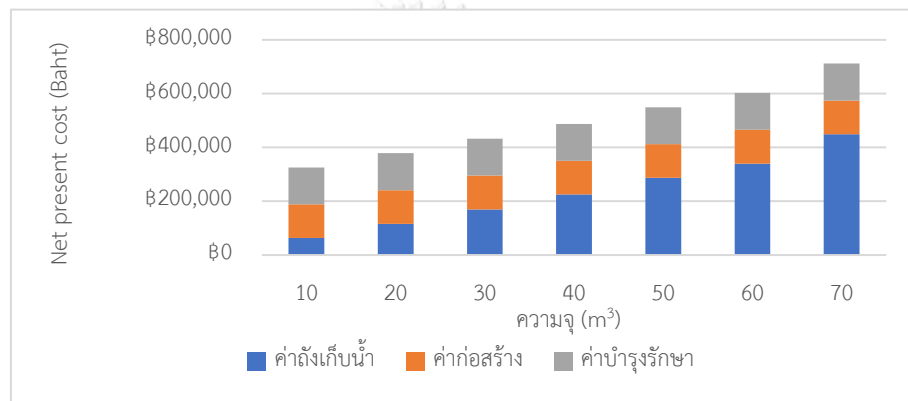


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าน้ำประปาที่ลดได้ในเวลา 50 ปี กับขนาดความจุถังเก็บน้ำของลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร

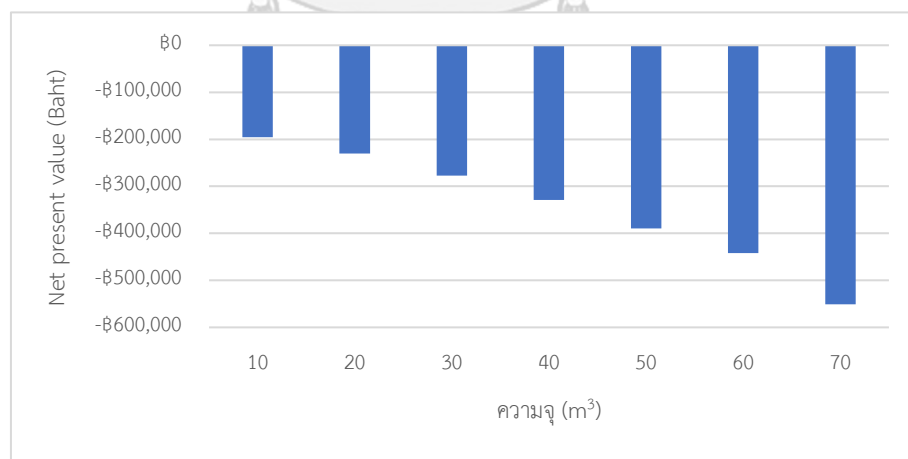
เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายของลานจอดรถยนต์คอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี ที่ความจุขนาดต่างๆ พบว่าค่าใช้จ่ายประกอบด้วยค่าถังเก็บน้ำ ค่าก่อสร้าง และค่าบำรุงรักษา โดยที่ค่าใช้จ่ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของความจุถังเก็บน้ำเนื่องจากค่าถังเก็บน้ำที่ราคาสูงขึ้นตามความจุ เมื่อพิจารณาที่ขนาดความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นขนาด

ความจุที่ทำให้ปริมาณน้ำประปาที่ผลิตได้เริ่มคงที่ พบว่ามีค่าถึงเก็บน้ำราคา 225,000 บาท ค่าก่อสร้างราคา 125,300 บาท และค่าบำรุงรักษาในเวลา 50 ปี ราคา 137,408 บาท รวมเป็นเงิน 487,708 บาท ดังรูปที่ 4.16

เมื่อพิจารณามูลค่าปัจจุบันสุทธิกับขนาดพื้นที่ลานจอตรยนต์คอนกรีตพูนมีระบบกักเก็บน้ำขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี ที่ความจุขนาดต่างๆพบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าติดลบในทุกขนาดความจุ เนื่องจากผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากค่าน้ำประปาที่ผลิตได้ ไม่สามารถชดเชยกับต้นทุนค่าใช้จ่ายของคอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำฝนได้ นอกจากนี้มูลค่าปัจจุบันสุทธิยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดความจุถึงเก็บน้ำเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ต้นทุนของลานจอตรยนต์คอนกรีตพูนแบบมีระบบกักเก็บน้ำขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี ที่ความจุขนาดต่างๆ



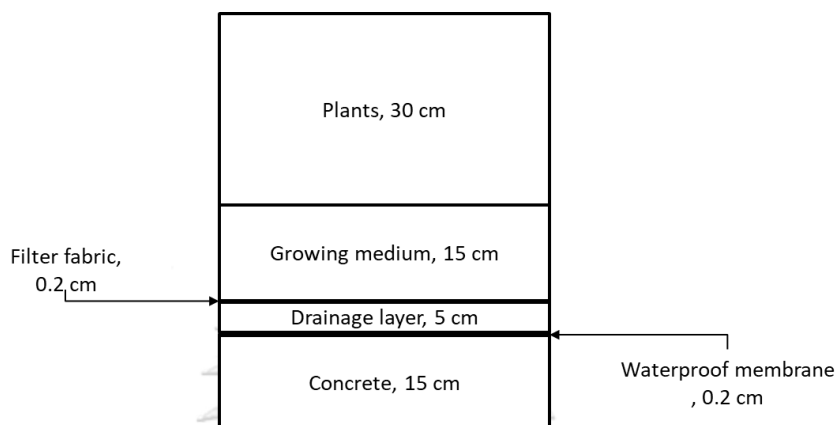
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของมูลค่าปัจจุบันสุทธิกับขนาดพื้นที่ลานจอตรยนต์คอนกรีตพูนมีระบบกักเก็บน้ำขนาดพื้นที่ 200 ตารางเมตร ในเวลา 50 ปี ที่ความจุขนาดต่างๆ

4.4 การจัดการน้ำร่วมกับการอนุรักษ์พลังงาน

4.4.1 หลังคาเขียว

การประเมินศักยภาพของหลังคาเขียวประกอบด้วยการประเมินศักยภาพในด้านการจัดการน้ำและศักยภาพในด้านการช่วยอนุรักษ์พลังงานในอาคารโดยหลังคาเขียวที่ประเมินมีส่วนประกอบดังรูปที่

4.18



รูปที่ 4.19 ส่วนประกอบหลังคาเขียว

4.4.1.1 การจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว

จากข้อมูลความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนด้วยหลังคาเขียวและสถิติฝนระยะเวลา 10 ปีย้อนหลังช่วงของพื้นที่กรณีศึกษาเมื่อนำมาคำนวณเพื่อหาปริมาณน้ำฝนที่หลังคาเขียวสามารถกักเก็บไว้ได้พบว่า ในระยะเวลา 10 ปี หลังคาเขียวสามารถกักเก็บน้ำฝนได้ 19,608 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานหลังคาเขียว 50 ปี จะสามารถกักเก็บน้ำฝนได้ถึง 98,040 ลูกบาศก์เมตร

พิจารณาปริมาณน้ำประปาที่ต้องใช้ในการรดน้ำต้นไม้โดยคำนวณจากปริมาณความความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้คือ 1.7 ลิตร/ตารางเมตร/วัน (เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์, 2536) และพื้นที่หลังคาเขียว 1,542 ตารางเมตร ดังนั้นความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้คือ 2.62 ลูกบาศก์เมตร/วัน และมีเงื่อนไขว่าถ้าหากวันใดที่มีปริมาณฝนตกถึงความต้องการน้ำแล้วจะไม่มีกรรดน้ำต้นไม้ในวันนั้น เมื่อพิจารณาความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้ร่วมกับสถิติปริมาณฝนที่ตกในแต่ละวัน พบว่าในระยะเวลา 10 ปี หลังคาเขียวต้องการน้ำประปา 6,417 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานหลังคาเขียว 50 ปี จะต้องการน้ำประปา 32,085 ลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปา 16.30 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์

จากปริมาณน้ำฝนที่สามารถกักเก็บไว้ได้ 98,040 ลูกบาศก์เมตร และจากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. ระบุว่า การรวบรวมและการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียชุมชนของเมืองขนาดใหญ่มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 1.33×10^{-4} ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์/ลูกบาศก์เมตร ดังนั้นหลังคาเขียวจึงช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือน

กระจกจากการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดได้ 13.04 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ในเวลา 50 ปี

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตน้ำประปาสำหรับรดน้ำหลังคาเขียวและปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้จากการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดพบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยออกมามากกว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่สามารถลดได้ อยู่ 3.26 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 4.3 สรุปการจัดการน้ำด้วยหลังคาเขียว

ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บ/ 50ปี	ปริมาณน้ำประปาที่ต้องใช้ รดน้ำ/50ปี	ลดก๊าซเรือนกระจก/50ปี
98,040 m ³	32,085 m ³	-3.26 tCO ₂ eq

4.4.1.2 การประหยัดพลังงานจากหลังคาเขียว

จากการประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานจากหลังคาเขียวด้วยโปรแกรมประยุกต์ Open Studio โดยอาศัยฐานข้อมูลการคำนวณจาก Energy Plus จำลองการใช้พลังงานภายในอาคารวิศวะฯ 100ปี โดยให้หลังคาคอนกรีตเป็นหลังคาอ้างอิงเปรียบเทียบกับหลังคาที่มีการติดตั้งหลังคาเขียว โดยหลังคาอ้างอิงมีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของหลังคาอ้างอิง

วัสดุ	ความหนา	ความหนาแน่น	การนำความร้อน	ความร้อนจำเพาะ
	(m)	(kg/m ³)	(W/m·k)	(J/kg·K)
คอนกรีต	0.15	2,240	1.31	836.8

จากการจำลองการใช้พลังงานภายในอาคารวิศวะฯ 100 ปี ในส่วนระบบปรับอากาศ พบว่าในระยะเวลา 1 ปี มีการใช้พลังงานไป 1,439,362.47 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองสัดส่วนการใช้พลังงานของอาคารวิศวะฯ 100ปี กรณีหลังคาอ้างอิง

	ระบบปรับอากาศ	ไฟฟ้าส่องสว่าง	อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ	รวม
ปริมาณไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	1,439,362.47	710,746.77	482,233.72	2,632,342.96

สำหรับกรณีหลังคาที่ติดตั้งหลังคาเขียว การจำลองการใช้พลังงานมีตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณโดยแบ่งออกเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืชและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับดิน แสดงในตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืช

Parameters	Range	Typical Value	Default	Unit
Height of plants	0.005-1.0	-	0.2	m
Leaf area index	0.001-5.0	-	1.0	-
Leaf reflectivity	0.05-0.5	0.18-0.25	0.22	-
Leaf Emissivity	0.8-1.0	-	0.95	-
Minimum stomatal resistance	50-300	-	180	s/m

(DOE, 2010)

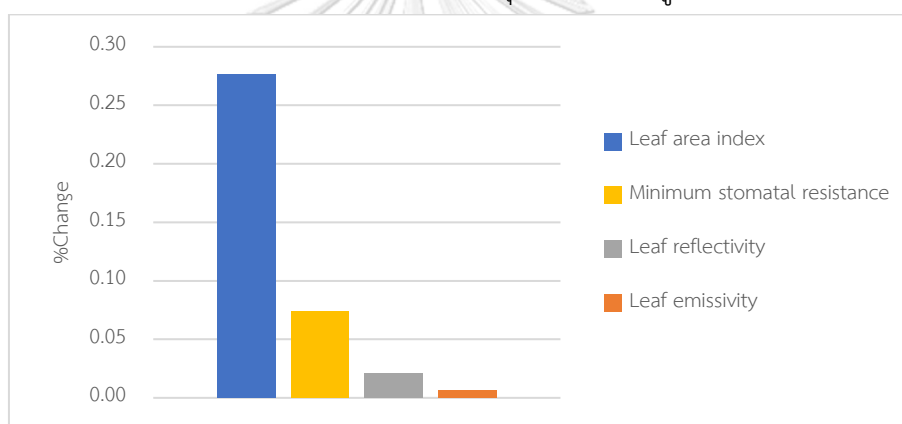
ตารางที่ 4.7 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับดิน

Parameters	Range	Typical Value	Default	Unit
Roughness	Very Rough - Very Smooth	-	Medium Rough	-
Thickness	0.05-0.7	0.1 and 0.15	0.1	m
Conductivity of Dry Soil	0.2-1.5	0.3-0.5	0.35	W/(m-K)
Density of Dry Soil	300-2,000	400-1,000	1,100	Kg/m ³
Specific Heat of Dry Soil			1,200	J/(kg-K)
Thermal Absorptance	0.0-1.0	0.9-0.98	0.9	-
Solar Absorptance	0.0-1.0	0.6-0.85	0.7	-
Visible Absorptance	0.5-1.0		0.75	-
Saturation Volumetric Moisture Content of the Soil Layer	0.1-0.5	<0.5	0.3	-

Residual Volumetric Moisture Content of the Soil Layer	0.01-0.1	-	0.01	-
Initial Volumetric Moisture Content of the Soil Layer	0.05-0.5	-	0.1	-

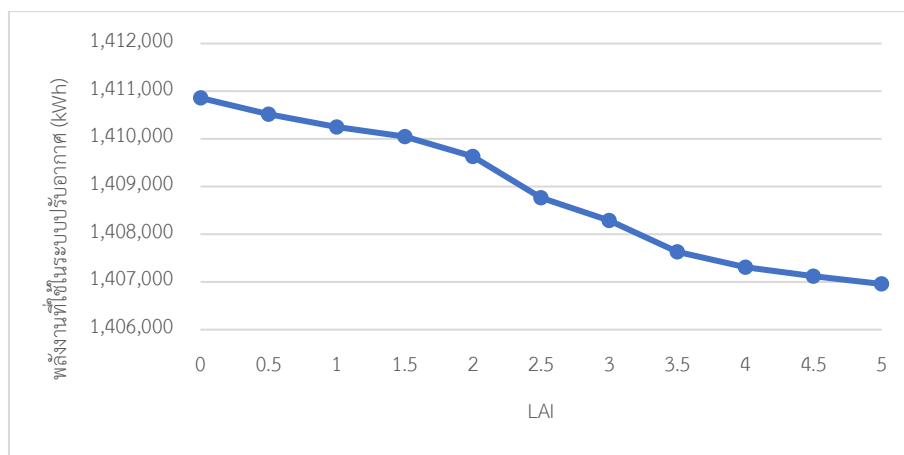
(DOE, 2010)

จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรต่างๆเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานในอาคารต่ำสุดและสูงสุด พบว่าในส่วนของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืชนั้น ค่า Leaf area index (LAI) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการช่วยประหยัดพลังงานภายในอาคารมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความสำคัญของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืชต่อการใช้พลังงานภายในอาคาร

เมื่อจำลองการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศโดยทำการปรับเปลี่ยนค่า LAI ตั้งแต่ 0.001 - 5 พบว่าระบบปรับอากาศมีการใช้พลังงานลดลงเมื่อพืชที่ใช้ในหลังคาเขียวมีค่า LAI สูงขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่ของใบปกคลุมมากยิ่งขึ้นจึงมีร่มเงาที่ช่วยลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้มากขึ้น ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศกับค่า LAI

การจำลองการใช้พลังงานภายในอาคารวิศวะ 100 ปี เปรียบเทียบการใช้พลังงานภายในอาคารในกรณีที่มีการติดตั้งหลังคาเขียว มีพันธุ์พืชที่ใช้ในการคำนวณคือต้นพลับพลึงตีนเป็ด (*Hymenocallis littoralis*) มีค่า LAI เท่ากับ 3.31 และกำหนดตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับพืช ดังตารางที่ 4.8 และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับดิน ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพืชที่ใช้ในการจำลองการประหยัดพลังงานของหลังคาเขียว

Parameters	Value	Unit	Sourced
Height of Plants	30	cm	Observed
Leaf Area Index	3.31	-	(Yu, C., 2006)
Leaf Reflectivity	0.22	-	Default
Leaf Emissivity	0.95	-	Default
Minimum Stomatal Resistance	180	s/m	Default

ตารางที่ 4.9 ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับดินที่ใช้ในการจำลองการประหยัดพลังงานของหลังคาเขียว

Parameters	Value	Unit	Sourced
Roughness	Medium Rough	-	Default
Thickness	0.15	m	Default
Conductivity of Dry Soil	0.35	W/(m-K)	Default
Density of Dry Soil	1,100	Kg/m ³	Default

Specific Heat of Dry Soil	1,200	J/(kg-K)	Default
Thermal Absorptance	0.9	-	Default
Solar Absorptance	0.7	-	Default
Visible Absorptance	0.75	-	Default
Saturation Volumetric Moisture Content of the Soil Layer	0.3	-	Default
Residual Volumetric Moisture Content of the Soil Layer	0.01	-	Default
Initial Volumetric Moisture Content of the Soil Layer	0.1	-	Default

จากการจำลองการใช้พลังงานภายในอาคารวิศวะฯ 100ปี เมื่อมีการติดตั้งหลังคาเขียวดังรูปที่ 4.18 และตัวแปรในการคำนวณดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 พบว่ามีการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศภายในระยะเวลา 1ปี ทั้งสิ้น 1,407,977.24 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.10 ตารางที่ 4.10 ผลการจำลองสัดส่วนการใช้พลังงานของอาคารวิศวะฯ 100ปี ที่มีการติดตั้งหลังคาเขียว

	ระบบปรับอากาศ	ไฟฟ้าส่องสว่าง	อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ	รวม
ปริมาณไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	1,407,977.24	710,746.77	482,233.72	2,600,957.73

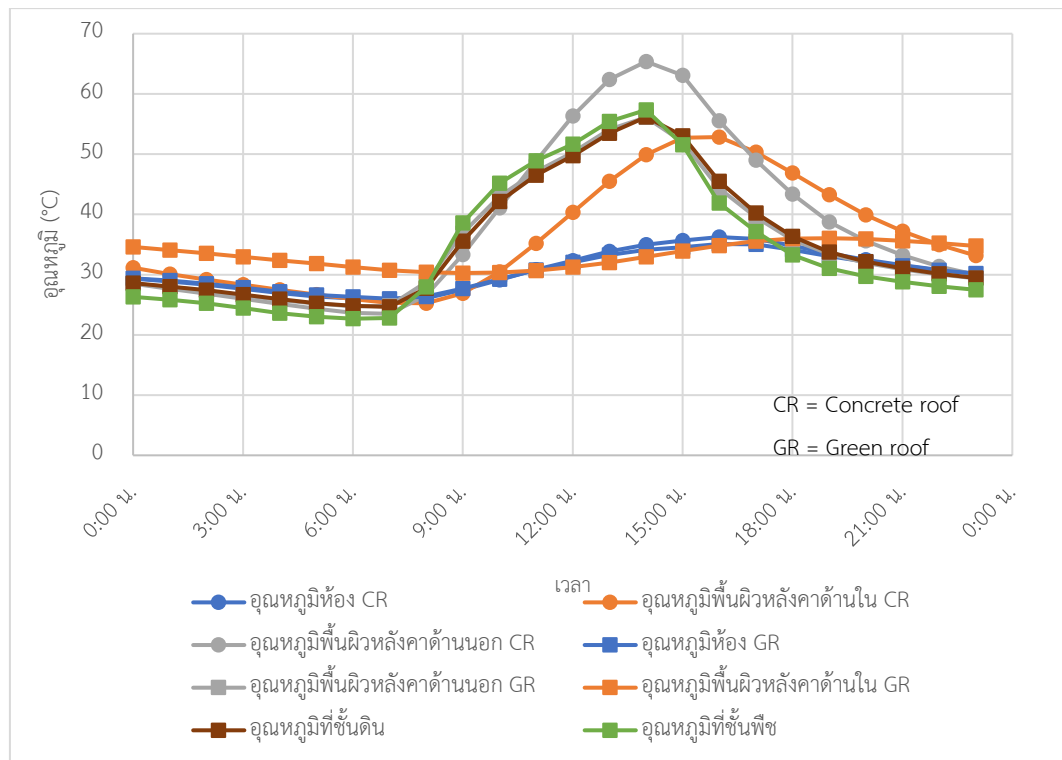
ระบบปรับอากาศมีการใช้พลังงานเป็นสัดส่วนที่สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 54.68 และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานภายในอาคารของทั้งสองกรณีพบว่า ในระยะเวลา 1 ปี การติดตั้งหลังคาเขียวสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ทั้งสิ้น 31,385 กิโลวัตต์-ชั่วโมงหรือเท่ากับร้อยละ 2.18 และจากข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารวิศวะฯ 100ปี ในปี พ.ศ. 2559 มีการใช้ไฟฟ้า

1,298,642 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และสมมติว่าเป็นการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศร้อยละ 54.68 หรือเท่ากับ 710,097 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ดังนั้นหากมีการติดตั้งหลังคาเขียวแล้วสามารถลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้ร้อยละ 2.18 แล้วจะสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารวิศวะฯ 100ปี ได้ 15,484 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี และเมื่อพิจารณาอายุการใช้งานหลังคาเขียว 50 ปี จะสามารถช่วยประหยัดพลังงานไปได้ 774,200 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือคิดเป็นการลดก๊าซเรือนกระจก 438.58 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการใช้งานจริงและหากมีการติดตั้งหลังคาเขียว

	หน่วย	การใช้งานจริง	หากติดตั้งหลังคาเขียว	ผลต่าง
พลังงานไฟฟ้า	kWh/yr	1,298,642	1,283,158	15,484
	kWh/50yr	64,932,100	64,157,900	774,200
ก๊าซเรือนกระจก	tCO ₂ eq/yr	735.68	726.91	8.77
	tCO ₂ eq/50yr	36,784.03	36,345.45	438.58

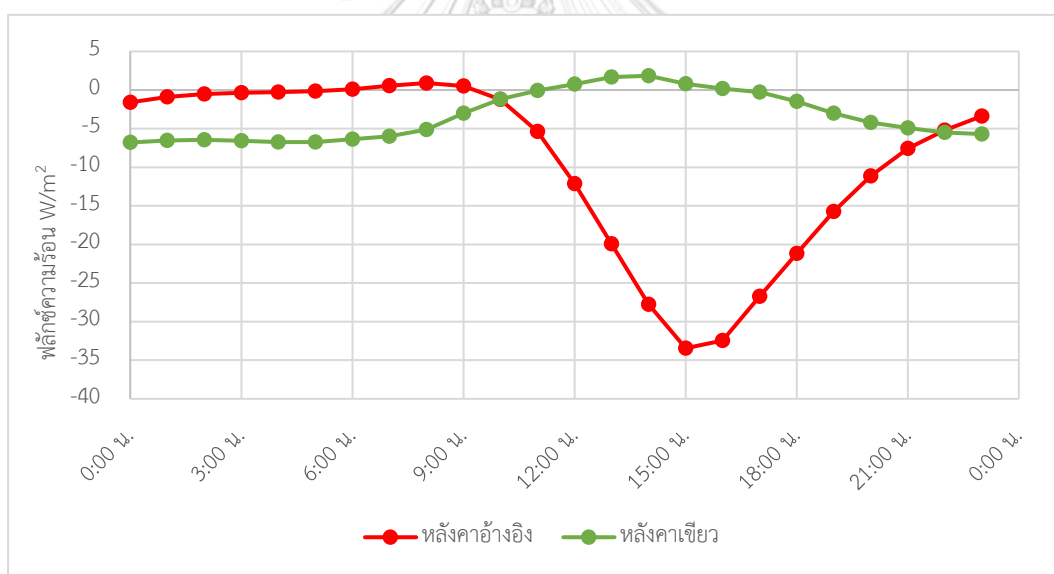
เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ของหลังคาเขียวทั้งในด้านการจัดการน้ำและด้านการประหยัดพลังงาน พบว่าในด้านการจัดการน้ำหลังคาเขียวมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากการใช้น้ำประปาในการรดน้ำหลังคาเขียว 16.30 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ และลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด 13.04 ขณะที่ในด้านการประหยัดพลังงานนั้นหลังคาเขียวช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้ 438.58 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นหลังคาเขียวสามารถช่วยลดก๊าซเรือนกระจกได้ 435.32 ตันเทียบเท่าคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาเปรียบเทียบกรณีหลังคาอ้างอิงและหลังคาเขียว

จากรูปที่ 4.21 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่พื้นผิวชั้นต่างๆ ของหลังคาและอุณหภูมิห้องของอาคารวิศวะ 100 ปี ในกรณีที่ติดตั้งหลังคาอ้างอิงและหลังคาเขียวเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อพิจารณาอุณหภูมิพื้นผิววัสดุพบว่าในทั้งสองกรณีอุณหภูมิพื้นผิววัสดุด้านในจะต่ำกว่าอุณหภูมิพื้นผิววัสดุด้านนอกในช่วงกลางวัน ในทางกลับกันขณะที่ช่วงกลางคืนพื้นผิววัสดุด้านในจะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิววัสดุด้านนอก เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหลังคาด้านนอกของหลังคาอ้างอิงกับอุณหภูมิที่ชั้นพืชซึ่งเป็นวัสดุที่อยู่ชั้นนอกสุดของอาคารพบว่าที่อุณหภูมิสูงสุดนั้นหลังคาอ้างอิงมีอุณหภูมิสูงกว่าหลังคาเขียวถึงประมาณ 10 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องจะเห็นว่า การติดตั้งหลังคาเขียวจะช่วยลดอุณหภูมิภายในห้องที่อุณหภูมิสูงสุดได้ประมาณ 1 องศาเซลเซียส ดังนั้นกล่าวได้ว่าหลังคาเขียวมีส่วนช่วยในการประหยัดพลังงานและยังช่วยยืดอายุการใช้งานของหลังคาคอนกรีตอีกด้วย

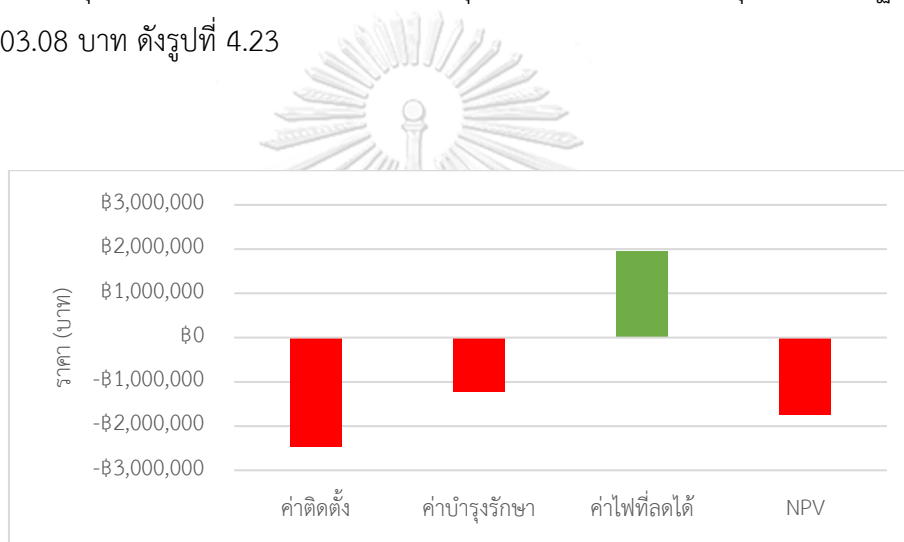
เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ภายในอาคาร จากรูปที่ 4.22 แสดงการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนเปรียบเทียบหลังคาเขียวกับหลังคาอ้างอิงในระยะเวลา 1 วัน โดยแกนตั้งแสดงปริมาณฟลักซ์ความร้อนโดยค่าบวกเป็นทิศที่ฟลักซ์ความร้อนพุ่งเข้าสู่พื้นผิวและแกนนอนแสดงเวลา โดยจะเห็นว่าในช่วงเวลากลางวันหลังคาอ้างอิงมีฟลักซ์ความร้อนเข้าสู่ห้องเป็นปริมาณมากเนื่องจากอุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิพื้นผิวหลังคาด้านในในช่วงเวลาดังกล่าวมีความแตกต่างกันมาก ขณะที่พิจารณากรณีที่ติดตั้งหลังคาเขียวพบว่าในช่วงเวลา 12.00น. ถึง 16.00น. ค่าฟลักซ์ความร้อนมีทิศทางพุ่งเข้าหาพื้นผิวหลังคาด้านในเนื่องจากการติดตั้งหลังคาเขียวช่วยลดอุณหภูมิของหลังคาได้ดี ทำให้ในช่วงเวลาดังกล่าวอุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิของพื้นผิวหลังคาด้านในดังนั้นฟลักซ์ความร้อนจึงมีทิศทางพุ่งเข้าหาพื้นผิวของหลังคาแต่ทั้งนี้ฟลักซ์ความร้อนที่เข้ามาทางผนังและกระจกก็ยังคงทำให้อุณหภูมิห้องสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองกรณีพบว่าหลังคาเขียวสามารถช่วยลดปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่เข้าสู่ห้องในเวลากลางวันได้แต่ในทางกลับกันก็ทำให้การคายความร้อนของอาคารช้าลงในเวลากลางคืนด้วย



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนเปรียบเทียบหลังคาเขียวกับหลังคาอ้างอิงใน 1 วัน

จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวพบว่า ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเป็นต้นทุนที่สูงที่สุด โดยมีค่าใช้จ่าย 1,600 บาท/ตารางเมตร ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา 25.27 บาท/ตารางเมตร/ปี และสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 15,484 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี หรือคิดเป็นมูลค่า 61,936 บาทต่อปี

เมื่อพิจารณาตลอดอายุการใช้งานหลังคาเขียว 50 ปี โดยมีอัตราคิดลดร้อยละ 2 พบว่า ในเวลา 50 ปี มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 2,467,200.00 บาท ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา 1,224,806.94 บาท ในขณะที่ผลประโยชน์ทางการเงินจากการลดรายจ่ายค่าไฟฟ้าคิดเป็นเงิน 1,946,203.87 บาท ไม่สามารถคืนทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาได้ โดยจะขาดทุนทางเศรษฐศาสตร์อยู่ 1,745,803.08 บาท ดังรูปที่ 4.23

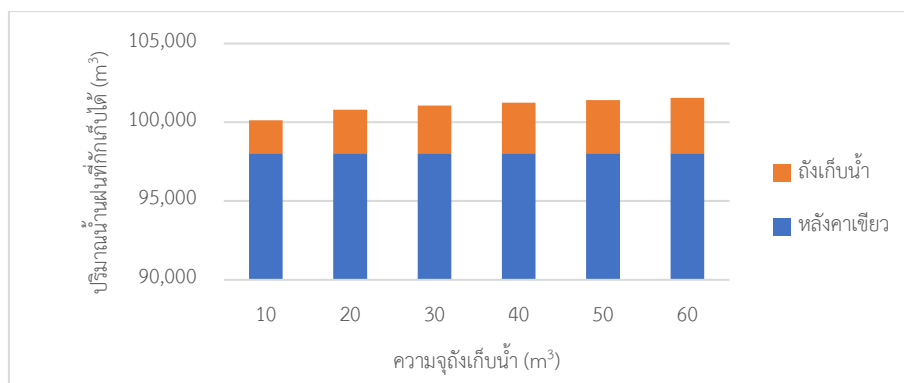


รูปที่ 4.24 ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวในเวลา 50 ปี

4.4.1.3 ทางเลือกหลังคาเขียวแบบมีถังกักเก็บน้ำฝน

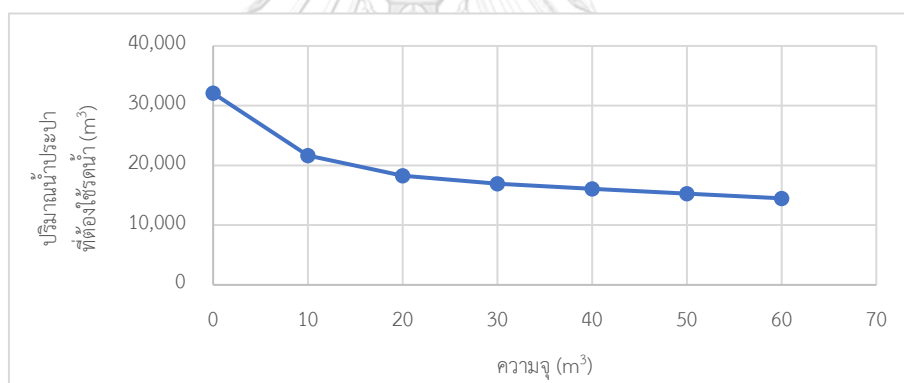
กรณีที่หลังคาเขียวมีการติดตั้งถังเก็บน้ำไว้เพื่อกักเก็บน้ำฝนส่วนเกินจากหลังคาเขียวไว้ใช้ประโยชน์ในการรดน้ำต้นไม้บนหลังคาทดแทนการใช้น้ำประปาโดยที่ความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้คือ 1.7 ลิตร/ตารางเมตร/วัน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2536) ซึ่งจากการที่หลังคาเขียวมีพื้นที่ 1,542 ตารางเมตร ดังนั้นความต้องการน้ำสำหรับรดน้ำต้นไม้คือ 2.62 ลูกบาศก์เมตร/วัน และมีเงื่อนไขว่าถ้าหากวันใดที่มีปริมาณฝนตกถึงความต้องการน้ำแล้วจะไม่มีมารรดน้ำต้นไม้ในวันนั้น

ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้จากหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำในเวลา 50 ปี ประกอบด้วยปริมาณน้ำฝนที่ถูกกักเก็บไว้ได้จากหลังคาเขียวและปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้ในถังเก็บน้ำ พบว่าปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้เพิ่มขึ้นตามขนาดความจุถังเก็บน้ำ ดังรูปที่ 4.24



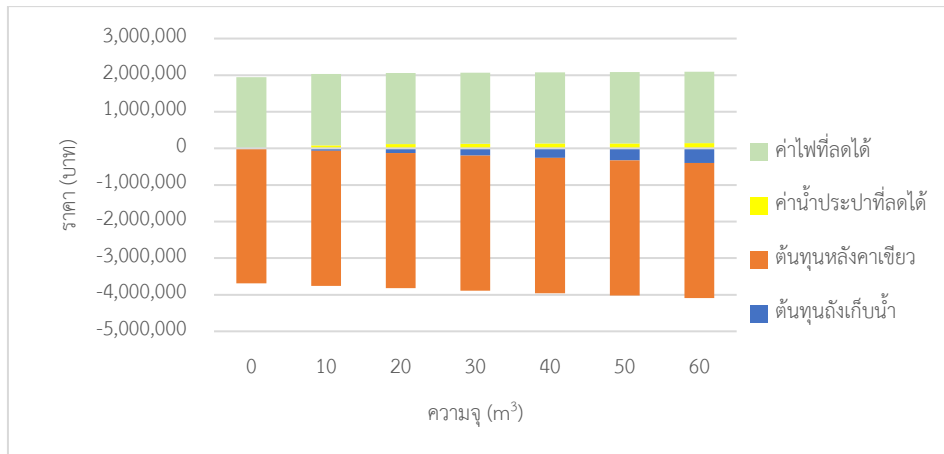
รูปที่ 4.25 ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บได้จากหลังคาเขียวที่มีถังเก็บน้ำในเวลา 50 ปี

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำประปาที่ต้องใช้ในการรดน้ำหลังคาเขียว พบว่าปริมาณการใช้น้ำประปามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มขนาดความจุถังเก็บน้ำ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งถังเก็บน้ำพบว่า การติดตั้งถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร สามารถช่วยลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ถึง 11,133 ลูกบาศก์เมตร ดังรูปที่ 4.25

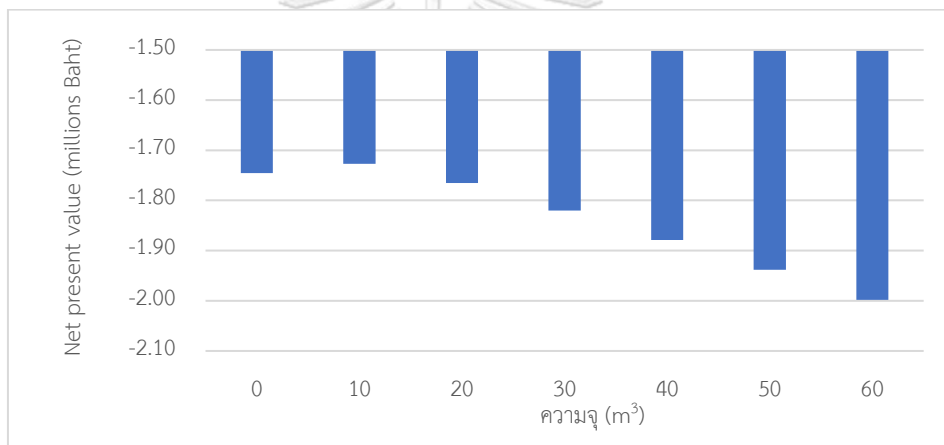


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำประปาที่ต้องใช้รดน้ำหลังคาเขียวในเวลา 50 ปีกับความจุถังเก็บน้ำ

ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำที่ความจุต่างๆ ประกอบด้วยต้นทุนถังเก็บน้ำ ต้นทุนหลังคาเขียว ค่าน้ำประปาที่ลดได้ และค่าไฟที่ลดได้ ในเวลา 50 ปี พบว่าการติดตั้งถังเก็บน้ำเพื่อกักเก็บน้ำฝนไว้ใช้รดน้ำหลังคาเขียวทดแทนน้ำประปามีต้นทุนเพิ่มขึ้นตามขนาดของความจุถังเก็บน้ำซึ่งก็สามารถลดค่าน้ำประปาได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนถังเก็บน้ำกับค่าน้ำประปาที่ลดได้แล้ว พบว่าค่าน้ำประปาที่ลดได้ไม่สามารถชดเชยต้นทุนถังเก็บน้ำที่เพิ่มขึ้นได้ ดังรูปที่ 4.26 และเมื่อพิจารณาต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ทั้ง 4 ด้าน พบว่าการติดตั้งถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร จะทำให้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด และมูลค่าปัจจุบันสุทธิจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มขนาดความจุถังเก็บน้ำ ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ต้นทุนและผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำที่ความจุต่างๆ



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของมูลค่าปัจจุบันสุทธิกับความจุถังเก็บน้ำขนาดต่างๆ

4.5 เปรียบเทียบต้นทุนและผลประโยชน์จากการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในแต่ละแนวทาง

ส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิและผลประโยชน์ทั้งด้านการช่วยกักเก็บน้ำฝน เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดน้ำท่วมและด้านการช่วยลดก๊าซเรือนกระจกจากการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในแต่ละแนวทางเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่มีความคุ้มค่ามากที่สุดในพื้นที่กรณีศึกษาในระยะเวลาโครงการ 50 ปี

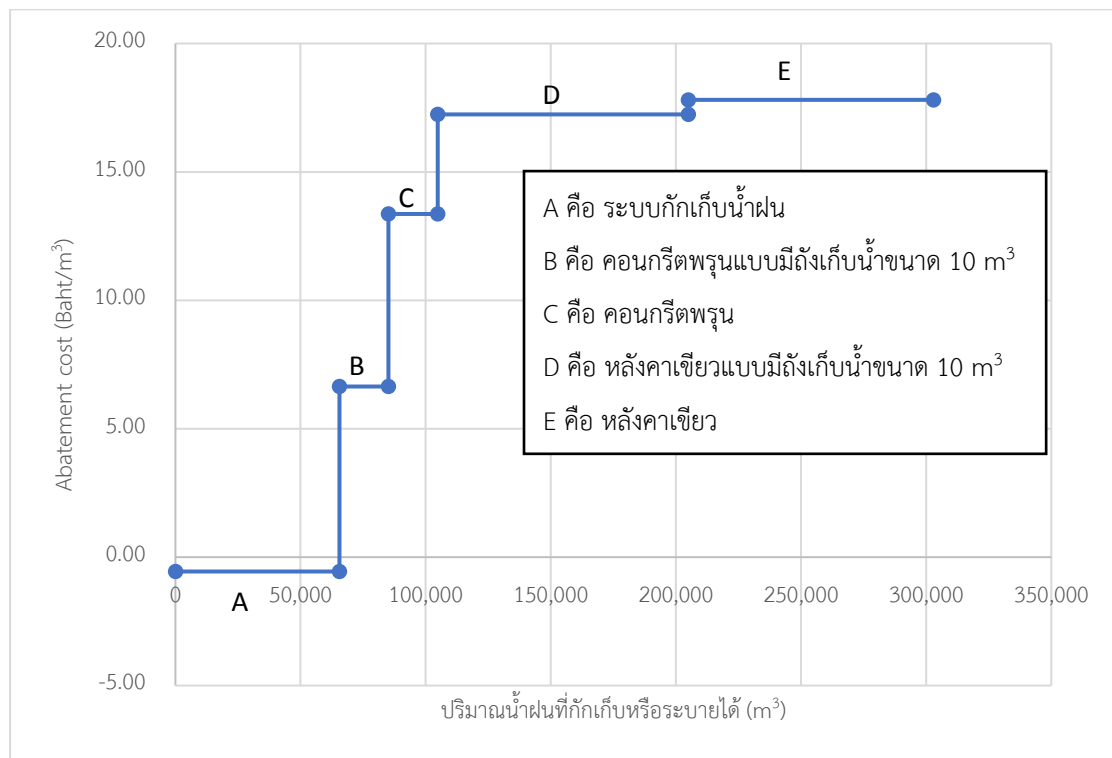
ตารางที่ 4.12 มูลค่าปัจจุบันสุทธิและผลประโยชน์ด้านการจัดการน้ำและการลดก๊าซเรือนกระจกของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวต่างๆ ในระยะเวลาโครงการ 50 ปี

มาตรการโครงสร้างพื้นฐานสีเขียว	ปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บหรือระบายได้ (m ³)	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ (tCO ₂ eq)	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)
ระบบกักเก็บน้ำฝนขนาด 40 m ³	65,503	42.00	36,554
หลังคาเขียว	98,040	435.32	-1,745,803
หลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 m ³	100,123	440.88	-1,726,721
คอนกรีตพูน	19,651	2.61	-262,708
คอนกรีตพูนแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 m ³	19,651	10.70	-130,596

จากตารางที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิและผลประโยชน์ด้านการจัดการน้ำและการลดก๊าซเรือนกระจกของมาตรการโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวต่างๆ ในระยะเวลาโครงการ 50 ปี พบว่าหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่จะเข้าสู่ท่อระบายน้ำและเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียได้มากที่สุด รองลงมาเป็น หลังคาเขียว ระบบกักเก็บน้ำฝนขนาด 40 ลูกบาศก์เมตร คอนกรีตพูน และคอนกรีตพูนแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจก พบว่าหลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร สามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด รองลงมาเป็น หลังคาเขียว ระบบกักเก็บน้ำฝน คอนกรีตพูนแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร และคอนกรีตพูน ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิ พบว่าระบบกักเก็บน้ำฝนขนาด 40 ลูกบาศก์เมตร มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิตั้งแต่ลบที่สุด รองลงมาเป็น คอนกรีตพูนแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร คอนกรีตพูน หลังคาเขียวแบบมีถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร และหลังคาเขียว ตามลำดับ

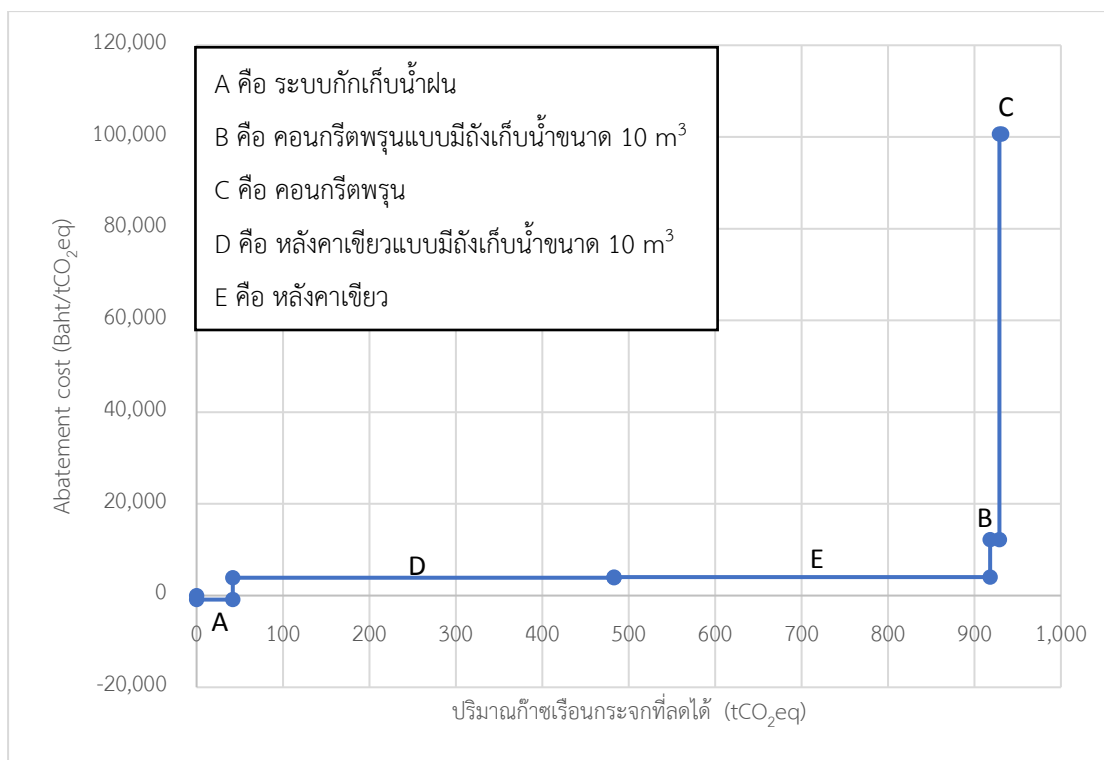
เมื่อพิจารณาต้นทุนหน่วยสุดท้ายต่อปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บหรือระบายได้ของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวต่างๆ พบว่าหากมีจุดประสงค์ในการลดความเสี่ยงหรือบรรเทาปัญหาน้ำท่วมแล้ว ทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่ควรพิจารณาทำก่อนอันดับแรก คือ ระบบกักเก็บน้ำฝนของอาคารวิศวะฯ 100 ปี ที่มีขนาดความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากเป็นทางเลือกที่นอกจากจะช่วยลดปริมาณน้ำฝนที่เข้าสู่ท่อระบายน้ำแล้วยังสามารถได้รับประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย สำหรับทางเลือกอื่นๆ เป็นทางเลือกที่ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมโดยที่ทางเลือกหลังคาเขียวมีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็

สามารถกักเก็บปริมาณน้ำฝนได้มากเช่นกันและควรที่จะติดตั้งถังเก็บน้ำขนาด 10 ลูกบาศก์เมตรเพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความสามารถกักเก็บน้ำฝน ขณะที่ทางเลือกคอนกรีตพูนมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าทางเลือกหลังคาเขียวแต่มีศักยภาพในการป้องกันน้ำท่วมน้อยที่สุดและควรติดตั้งถังเก็บน้ำใต้ดินขนาด 10 ลูกบาศก์เมตร จะสามารถลดค่าใช้จ่ายของคอนกรีตพูนได้เยอะ ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.29 ต้นทุนหน่วยสุดท้ายต่อปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บหรือระบายได้ของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ

เมื่อทำการวิเคราะห์ ต้นทุนหน่วยสุดท้ายต่อการลดก๊าซเรือนกระจกของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวต่างๆ พบว่าหากมีจุดประสงค์ในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกแล้ว ทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่ควรพิจารณาทำก่อนอันดับแรก คือ ระบบกักเก็บน้ำฝนของอาคารวิศวะ 100 ปี ที่มีขนาดความจุ 40 ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากเป็นทางเลือกที่นอกจากจะช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกแล้วยังสามารถได้รับประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย สำหรับทางเลือกอันดับถัดมา คือ หลังคาเขียวโดยที่ควรติดตั้งถังเก็บน้ำฝนขนาดความจุ 10 ลูกบาศก์เมตร ของอาคารวิศวะ 100 ปี ซึ่งเป็นทางเลือกที่ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุดแต่ทางคณะก็จะต้องมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ทางเลือกคอนกรีตพูนเป็นทางเลือกที่ไม่แนะนำให้ทำเนื่องจากเป็นทางเลือกที่ลดก๊าซเรือนกระจกได้น้อยและมีค่าใช้จ่ายสูง ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.30 ต้นทุนหน่วยสุดท้ายต่อการลดก๊าซเรือนกระจกของทางเลือกโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวต่างๆ

หากพิจารณาคุณประโยชน์ของโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวเฉพาะในด้านการจัดการน้ำ การลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและการลดค่าใช้จ่ายในการลดปริมาณการใช้น้ำประปา หรือลดการใช้พลังงานแล้ว อาจจะไม่สามารถสร้างผลกำไรเป็นตัวเงินได้ แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวยังมีประโยชน์ร่วมอื่นๆ ที่นำมาคำนวณเป็นมูลค่าเงินได้ยาก ตัวอย่างเช่น

- การช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ

Brattebo, B.O. และ Booth, D.B. (2003) ศึกษาลานจอดรถที่ติดตั้งคอนกรีตพูนในด้านความคงทน การลดปริมาณน้ำฝนไหลบ่า และคุณภาพของน้ำที่แทรกซึมผ่านไปได้ พบว่าหลังการใช้งานทุกวันเป็นเวลา 6 ปี ไม่พบสัญญาณการสึกหรอของลานจอดรถ และน้ำฝนสามารถซึมผ่านไปได้ทั้งหมดโดยแทบไม่มีน้ำฝนไหลบ่าบนพื้นผิวเลย ขณะที่ในด้านคุณภาพน้ำที่ผ่านการกรองพบว่าปริมาณทองแดงและสังกะสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับน้ำฝนที่ไหลออกจากพื้นผิวยางมะตอย นอกจากนี้ยังตรวจพบน้ำมันเครื่องในตัวอย่างร้อยละ 89 ของตัวอย่างน้ำจากพื้นผิวยางมะตอย แต่ไม่พบน้ำมันเครื่องเลยในตัวอย่างน้ำฝนที่แทรกซึมผ่านคอนกรีตพูน

- การช่วยปรับปรุงคุณภาพอากาศ

หลังคาเขียวมีความสามารถในการจับอนุภาคฝุ่นที่เป็นอันตรายได้ ช่วยเพิ่มความสบายในพื้นที่เมืองโดยจากการศึกษาของ Zhang, X. และคณะ (1997) หลังคาเขียวขนาด 1,000 ตารางเมตร ช่วยดักจับอนุภาคฝุ่นละอองได้ถึงประมาณ 160 – 220 กิโลกรัม/ปี สอดคล้องกับการศึกษาของ Huang, J. (1994) ซึ่งพบว่าหลังคาเขียวช่วยลดปริมาณฝุ่นในอากาศที่ตกลงสู่พื้นที่เมืองได้ถึง 100 มิลลิกรัม/เมตร แต่ทั้งนี้พืชแต่ละชนิดก็มีความสามารถในการดักจับอนุภาคฝุ่นละอองที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและลักษณะการเรียงตัวปกคลุมของใบ โดย Zhang, X. และคณะ (1997) พบว่าพืชประเภทไม้พุ่มสามารถดักจับฝุ่นละอองได้ดีกว่าหญ้า และจากการศึกษาของ Zhao, Y. และคณะ (2002) พบว่าสัดส่วนในการดักจับฝุ่นละอองในพื้นที่เมืองคิดเป็นการดักจับโดยต้นไม้ร้อยละ 87.0 ไม้พุ่มร้อยละ 11.3 และหญ้าร้อยละ 1.7

- การช่วยลดมลพิษทางเสียง

หลังคาเขียวมีความสามารถในการดูดซับคลื่นเสียงซึ่งช่วยลดระดับเสียงรบกวนได้เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่มีการติดตั้งหลังคาเขียว โดยจากการศึกษาของ Connelly, M. และ Hodgson, M. (2013) พบว่าหลังคาเขียวช่วยลดระดับมลพิษทางเสียงได้ 10-20 เดซิเบล

- การช่วยปรับปรุงระบบนิเวศน์เมือง

จากการศึกษาของ Peng, L.L. และ Jim, C. (2013) พบว่าหลังคาเขียวมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มนิเวศวิทยาของเมือง อย่างไรก็ตามการวัดและประเมินผลด้านนี้ในเขตเมืองยังทำได้ยาก การศึกษาของ MacIvor, J.S. และ Lundholm, J. (2011) แสดงให้เห็นว่าหลังคาเขียวช่วยส่งเสริมความหลากหลายทางชีวภาพและช่วยลดการสูญเสียถิ่นที่อยู่อาศัยในพื้นที่เมือง

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่าโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวมีความสามารถในการให้ประโยชน์หลายด้าน (Multifunction) ซึ่งแตกต่างจากโครงสร้างพื้นฐานสีเทา (Gray infrastructure) ซึ่งปกติสามารถให้ประโยชน์ได้เพียงด้านเดียว ดังนั้นแล้วเพื่อเป็นการส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาโครงข่ายโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวให้เชื่อมโยงถึงกัน ภาครัฐควรจัดทำแผนแม่บทในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวรวมถึงมีการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของภาคเอกชน ประชาชน ทุกภาคส่วนอย่างบูรณาการ โดยจากกรณีศึกษาที่พบว่า ข้อจำกัดสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวคือข้อจำกัดทางการเงิน เนื่องจากบางทางเลือกเช่น หลังคาเขียวและคอนกรีตพูน มีต้นทุนในการดำเนินการก่อสร้างและบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูง โดยที่ไม่สามารถคืนทุนในทางการเงินได้ ดังนั้นแล้วจึงควรมีการให้ความ

ช่วยเหลือทางการเงินเพื่อดึงดูดให้ภาคส่วนต่างๆ มาร่วมมือกันพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวมากขึ้น
เช่น การให้เงินอุดหนุน การยกเว้นหรือลดหย่อนภาษี เป็นต้น



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาศักยภาพโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่เกี่ยวข้องกับการจัดการน้ำฝนในพื้นที่เมือง ได้แก่ ระบบกักเก็บน้ำฝน หลังคาเขียว และคอนกรีตพรุน โดยพิจารณาปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงต่อระบายน้ำที่ลดลง การนำน้ำฝนกลับมาใช้ประโยชน์ และศึกษาปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดลงได้จากการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัด การลดการใช้น้ำประปา และการอนุรักษ์พลังงานของมาตรการดังกล่าว รวมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะเวลาโครงการ 50 ปี โดยมีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นพื้นที่กรณีศึกษา

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ระบบกักเก็บน้ำฝนเป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงต่อระบายน้ำโดยการกักเก็บน้ำฝนไว้เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ทดแทนการใช้น้ำประปา และช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้ โดยขนาดความจุถึงเก็บน้ำฝนที่เหมาะสมคือ 40 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเป็นขนาดความจุที่ระบบกักเก็บน้ำฝนจะสามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงต่อระบายน้ำและลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุด ในขณะที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิของระยะเวลาโครงการ 50 ปี ยังมีค่าเป็นบวก

2. หลังคาเขียวเป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่นอกจากจะช่วยลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงต่อระบายน้ำแล้วยังมีผลประโยชน์ร่วมในการช่วยอนุรักษ์พลังงานของอาคารด้วย โดยหลังคาเขียวสามารถลดความเสี่ยงน้ำท่วมและลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากที่สุดซึ่งการช่วยอนุรักษ์พลังงานของหลังคาเขียวเป็นปัจจัยหลักในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์จะเห็นว่าหลังคาเขียวมีต้นทุนหลักคือค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างซึ่งสูงกว่าค่าการบำรุงรักษาในระยะเวลาโครงการ 50 ปี ประมาณ 2 เท่า ซึ่งไม่สามารถชดเชยด้วยการลดค่าไฟฟ้าจากการอนุรักษ์พลังงานได้ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการจึงมีค่าติดลบ

3. การติดตั้งถังเก็บน้ำให้กับหลังคาเขียวสามารถช่วยเพิ่มศักยภาพในการลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงต่อระบายน้ำและช่วยลดปริมาณน้ำประปาที่ใช้น้ำต้นทุนไม่ของหลังคาเขียวได้ โดยถังเก็บน้ำ

ขนาดความจุ 10 ลูกบาศก์เมตร เป็นขนาดความจุที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มมูลค่าปัจจุบันสุทธิของหลังคาเขียว

4. คอนกรีตพูนเป็นโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวที่สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำและลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกจากการลดปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดได้ ซึ่งการติดตั้งถังเก็บน้ำใต้ดินจะช่วยให้สามารถรวบรวมน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์เช่น รดน้ำต้นไม้ ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกให้กับโครงการ เมื่อพิจารณาทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า คอนกรีตพูนมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิติดลบเนื่องจากค่าน้ำประปาที่ลดได้จากการนำน้ำฝนกลับมารดน้ำต้นไม้ไม่สามารถชดเชยต้นทุนในก่อสร้างและบำรุงรักษาคอนกรีตพูนในระยะเวลาโครงการ 50ปี

5. หากจุดประสงค์หลักของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในพื้นที่ คือต้องการลดความเสี่ยงหรือบรรเทาปัญหาน้ำท่วม ควรเลือกพัฒนาระบบกักเก็บน้ำฝนก่อนเป็นอันดับแรกเนื่องจากสามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำและได้กำไรจากการลดค่าน้ำประปา อันดับถัดมาควรพัฒนาคอนกรีตพูนและหลังคาเขียวตามลำดับ

6. หากจุดประสงค์หลักของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวในพื้นที่ คือต้องการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก ควรเลือกพัฒนาระบบกักเก็บน้ำฝนก่อนเป็นอันดับแรกเนื่องจากสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกและยังได้กำไรกลับคืนมา อันดับถัดมาควรพัฒนาหลังคาเขียวเนื่องจากสามารถลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้มากแต่ไม่แนะนำให้พัฒนาคอนกรีตพูนเพื่อลดก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากจะมีค่าใช้จ่ายสูงแต่ลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกได้น้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การพิจารณาประโยชน์ของโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวควรพิจารณาให้รอบด้านเนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวยังมีคุณประโยชน์อีกหลายด้านที่คำนวณเป็นมูลค่าเงินไม่ได้
2. ทำการประเมินโครงสร้างพื้นฐานสีเขียวอื่นๆ เพิ่มเติมเพราะอาจเป็นแนวทางเลือกในการพัฒนาที่มีความเหมาะสมกับบริบทของพื้นที่
3. การใช้ค่าจริงในการจำลองปริมาณการใช้พลังงานของอาคารจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น

4. ทำการทดลองเพื่อให้ได้ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนของพืชท้องถิ่นที่สามารถปลูกบนหลังคาเขียวได้เพื่อให้ค่าที่คำนวณมีความแม่นยำยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

American Concrete Institute (2010). Report on Pervious Concrete. Detroit, USA.

Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G. and Vanoli, G. P. 2013. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? Applied Energy 104: 845-859.

Beatley, T. 2000. Preserving biodiversity: challenges for planners. Journal of the American Planning Association 66(1): 5-20.

Bell, R. and Wheeler, J. 2006. Talking trees: An urban forestry toolkit for local governments. ICLEI-Local Governments for Sustainability.

Benedict, M. A. and McMahon, E. T. 2006. Green infrastructure. Island, Washington, DC.

Boonyanusith, N., Kung, S. and Lin, H. 2015. Greenways: an important element of green infrastructure. NAJUA Architecture, Design and Built Environment 29: 387-404.

Brattebo, B. O. and Booth, D. B. 2003. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. Water research 37(18): 4369-4376.

Carter, J. (1995). "The potential of urban forestry in developing countries: A concept paper." from <http://www.fao.org/docrep/005/t1680e/t1680e00.htm>.

Connelly, M. and Hodgson, M. 2013. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. Applied Acoustics 74(10): 1136-1143.

County Prince George's 1999. Low-impact development design strategies: An integrated design approach. Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division, Prince George's County, Maryland.

Davis, A. Y., Belaire, J. A., Farfan, M. A., Milz, D., Sweeney, E. R., Loss, S. R. and Minor, E. S. 2012. Green infrastructure and bird diversity across an urban socioeconomic gradient. Ecosphere 3(11): 1-18.

Dominique, M., Tiana, R. H., Fanomezana, R. T. and Ludovic, A. A. 2014. Thermal Behavior of Green Roof in Reunion Island: Contribution Towards a Net Zero Building. Energy Procedia 57: 1908-1921.

Durrans, S. R. and Dietrich, K. 2003. Stormwater conveyance modeling and design.

Ferguson, B. K. and France, R. 2002. Stormwater management and stormwater restoration. Handbook of water sensitive planning and design: 11-28.

Fewkes, A. 2006. The technology, design and utility of rainwater catchment systems. Water demand management: 27-51.

Foster, J., Lowe, A. and Winkelman, S. 2011. The value of green infrastructure for urban climate adaptation. Center for Clean Air Policy 750.

Gallet, D. 2011. The Value of Green Infrastructure: A Guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits. Proceedings of the Water Environment Federation 2011(17): 924-928.

Guo, C. 2008. Research on the impact of sedum lineare planted roof on the indoor and outdoor thermal environment in Guangzhou. University of South China University of Technology Press, Guangzhou.

Huang, J. (1994). Roof garden design and construction, Beijing: China Forestry Press.

IPCC 2001. Synthesis Report, Contributions of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, Watson RT and the Core Writing Team (eds.), Cambridge University Press 397.

Jim, C. and Chen, W. Y. 2009. Ecosystem services and valuation of urban forests in China. Cities 26(4): 187-194.

Johnson, A. (2013). Green infrastructure: a new strategy for stormwater management in downtown Wichita, Kansas State University.

König, K. W. and AG, D. W. (2001). The rainwater technology handbook: rainharvesting in building [international; fundamentals, practical aspects, outlook; includes materials and tools for planning and design!], Wilo-brain.

Leggett, D., Brown, R., Stanfield, G., Brewer, D. and Holliday, E. 2001. Rainwater and greywater use in buildings: decision-making for water conservation. CIRIA report PR80, London.

MacIvor, J. S. and Lundholm, J. 2011. Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats. Urban ecosystems 14(2): 225-241.

McMahon, E. 2000. Looking Around: Green Infrastructure. Planning Commission 37.

McNeil, J. and Vava, C. 2006. Oakville's urban forest: Our solution to our pollution. Town of Oakville, Parks and Open Space Department, Forestry Section.

Moghbel, M. and Erfanian Salim, R. 2017. Environmental benefits of green roofs on microclimate of Tehran with specific focus on air temperature, humidity and CO₂ content. Urban Climate 20: 46-58.

Noss, R. F. 1987. Protecting natural areas in fragmented landscapes. Natural Areas Journal: 2-13.

Pakzad, P. and Osmond, P. 2016. Developing a Sustainability Indicator Set for Measuring Green Infrastructure Performance. Procedia - Social and Behavioral Sciences 216: 68-79.

Peng, L. L. and Jim, C. 2013. Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. Energies 6(2): 598-618.

Pierpont, L. H. 2008. Simulation-optimization Framework to Support Sustainable Watershed Development by Mimicking the Pre-development Flow Regime.

PlaNYC Stormwater (2008).

Pouyat, R. V., Yesilonis, I. D. and Nowak, D. J. 2006. Carbon storage by urban soils in the United States. Journal of environmental quality 35(4): 1566-1575.

Roebuck, R. 2007. A whole life costing approach for rainwater harvesting systems. PhD, University of Bradford. 546pp.

Sailor, D. J. 2008. A green roof model for building energy simulation programs. Energy and Buildings 40(8): 1466-1478.

Shrestha, A., Babel, M., Weesakul, S. and Vojinovic, Z. 2017. Developing Intensity–Duration–Frequency (IDF) Curves under Climate Change Uncertainty: The Case of Bangkok, Thailand. Water 9(2): 145.

Uda, M., Van Seters, T., Graham, C. and Rocha, L. 2013. Evaluation of Life Cycle Costs for Low Impact Development Stormwater Management Practices. Final Report, Sustainable Technologies Evaluation Program, Toronto and Region Conservation Authority.

UNEP (2014). Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects.

United Nations (1992). United Nations framework convention on climate change. (United Nations Framework Convention on Climate Change). UN

Wang, X., Tian, Y. and Zhao, X. 2017. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. Sci Total Environ 592: 465-476.

WBDG (2016). "Extensive vegetative roofs." from <https://www.wbdg.org/resources/extensive-vegetative-roofs>.

Yu, C. (2006). The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate - a case study in Singapore. Department of Building, National University of Singapore. **Doctor of philosophy.**

Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., Zhou, B., . . . Liu, J. 2015. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. Landscape and urban planning 144: 142-150.

Zhang, X., Gu, R., Chen, Z. and Li, Y. 1997. Effect of Duct capturing of residential greenland in Beijing. J Beijing Univ Agric 19(4): 12-17.

Zhao, Y., Li, S. and Yan, Z. 2002. Duct capturing effect and assessment method for urban green space. J Huazhong Univ Agric 21(6): 582-586.

Ziogou, I., Michopoulos, A., Voulgari, V. and Zachariadis, T. 2018. Implementation of green roof technology in residential buildings and neighborhoods of Cyprus. Sustainable Cities and Society 40: 233-243.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2536). วิศวกรรมประปา, มิตรนราการพิมพ์.

พิศ คงบริรักษ์ และ กฤติกา สืบศักดิ์ 2011. การระเหยของน้ำในประเทศไทยคาบ 10 ปี (พ.ศ. 2544-2553). เอกสารผลงานวิชาการอุตุนิยมวิทยา.

วันชัย สะตะ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ 2016. คอนกรีตพูน: คอนกรีตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. วารสารคอนกรีต 29.

ศนิ ล้มทองสกุล 2554. การประยุกต์ใช้แนวทางการบริหารจัดการน้ำผิวดินด้วยแนวคิดLIDภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 1(60): 85-98.

ศูนย์ข้อมูลกรุงเทพมหานคร (2560). สืบค้นเมื่อ 6 มิถุนายน 2560
<http://203.155.220.230/m.info/nowbma/index.html>.

สำนักยุทธศาสตร์และประเมินผล (2558). สถิติกรุงเทพมหานคร 2558.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (2015). 2017,
<http://www.tgo.or.th>.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างข้อมูลปริมาณฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยา

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/1/60	0	0	0	0.2	0	0	3.2	6.5	9.9
10/1/60	7.2	10.3	8.2	6.1	1.5	0	0	0	33.3
11/1/60	0	0	1.3	0	0	0	0	0	1.3
12/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/1/60	0.4	0	0	0.2	0	0	0	0	0.6
18/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/1/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/2/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/3/60	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0.8
18/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/3/60	0	8.5	10.2	5.1	0.1	0	0	0	23.9
28/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/3/60	0	0	0	0	2	0	0	0	2
30/3/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/3/60	0	0	0	17.3	0	0	0	0	17.3

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/4/60	0	0	62.3	0.6	0	0	0	0	62.9
2/4/60	0	0	0	0	0	0	0	6.3	6.3
3/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/4/60	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0.6
5/4/60	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0.7
6/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/4/60	0	0	0	2.2	0	0	0	0	2.2
27/4/60	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0.5
28/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/4/60	0	0	0	0	0	2.5	0	0	2.5
30/4/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/5/60	0	1.4	26	0.4	0	0	0	0	27.8
6/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/5/60	0	2.2	1.2	0	0	0	0	0	3.4
8/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/5/60	0	0	0	3.6	0	3.5	0	1.3	8.4
11/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/5/60	1.8	0	0	3.5	14.1	13	0	0	32.4
13/5/60	0	0	7.2	0	2	0	0	0	9.2
14/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/5/60	0	72.7	18.2	1.5	0	0	4.1	0.3	96.8
17/5/60	25.4	13.6	0	0	12	1.2	0	0	52.2
18/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/5/60	0	0	0	0	7.5	38.8	0.5	3.8	50.6
20/5/60	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.5
21/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/5/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/5/60	0	0.7	0	0	0	34.8	0.3	0	35.8
25/5/60	36.5	5.9	11.4	0	0	0	0	0	53.8
26/5/60	0	0	0	0.8	0.1	5.6	0.8	0	7.3
27/5/60	0	0.8	0.1	0	0	25.4	25.2	2.5	54
28/5/60	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0.3
29/5/60	0	0	7.5	0	0	0	0	0	7.5
30/5/60	0	3.6	3.3	17.3	8	0.7	0	0	32.9
31/5/60	6.7	1.9	0.3	0	0	0	0	0	8.9

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/6/60	0	0	0	0	0	0	0	21	21
4/6/60	2.2	0	0	0	0	0	0	0	2.2
5/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6/6/60	0	0	0	0	0	0	0	5.1	5.1
7/6/60	0	0	0	0	0	0	0	9	9
8/6/60	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.2
9/6/60	0	0	0	0	0	0	2.9	0.6	3.5
10/6/60	0	0	0	0	0	0	29.1	0.3	29.4
11/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/6/60	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0.3
15/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/6/60	0	0	0	0	0	0	0	5	5
19/6/60	2	0	0	0	0	0	0	2.2	4.2
20/6/60	3.6	0.3	0	0	0	0	5.9	0.7	10.5
21/6/60	0	0	0	0	0	0	15.2	6.7	21.9
22/6/60	1.5	0	0	0	0	13.6	10.3	0	25.4
23/6/60	0	0	0	0	0	0	4.5	0	4.5
24/6/60	0	0	0	0	0	0.7	13.2	0	13.9
25/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/6/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/6/60	0	27.8	0	0	0	0	0	0	27.8
29/6/60	0	29.4	0	0	0	0	0	0	29.4
30/6/60	0	0	8.3	0	0	0	0	7.2	15.5

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/7/60	0	0	0	0	0	0	5.2	2.2	7.4
4/7/60	0	0	0	0	0	0	26.7	0.2	26.9
5/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6/7/60	0	0	0	0	0	0	42.8	2.4	45.2
7/7/60	0	0	0	0	0	0	5.6	12.2	17.8
8/7/60	1.3	0	0	0	0	0	0	0	1.3
9/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/7/60	3.7	4.1	3	0.1	0	0	0	0	10.9
11/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.6
12/7/60	54.7	4.7	0.8	0	0	0	0	0.3	60.5
13/7/60	6.1	2.3	0	0	0	0	0	0	8.4
14/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/7/60	0	0	0	0	0	0	0	6.8	6.8
16/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/7/60	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0.6
18/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/7/60	0	0	0	0	0	0	15.6	18.7	34.3
20/7/60	0	0	3.8	0	0	0	0	0	3.8
21/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/7/60	0	0	0	0	0	0	0	80.8	80.8
24/7/60	0	0	0	0	0	0	8.6	0	8.6
25/7/60	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0.2
26/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/7/60	0	0	0	0	0	0	5.5	0	5.5
29/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/7/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/8/60	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5
3/8/60	0	0	0	0	0	0	6	0	6
4/8/60	0	0	0	0	0	0	9.4	0	9.4
5/8/60	0	0	0	0	0	0	0	1.6	1.6
6/8/60	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0.8
7/8/60	0.9	0.8	0	0	0	0	0	0	1.7
8/8/60	1.8	0.2	7.9	0	0	0	0	0	9.9
9/8/60	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0.6
10/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/8/60	9.8	0.4	0	0	0	0	0	0	10.2
12/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/8/60	0	0	0	0	0	0	4.5	0	4.5
15/8/60	2.5	0	0	0	0	0	0	0	2.5
16/8/60	0	0	2	0	0	0	0	46	48
17/8/60	1.2	0	28	2.3	0	0	7.8	23	62.3
18/8/60	4	0.5	0	0	0	0	0	0	4.5
19/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0.8
20/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/8/60	0	0	0	0	0	0	30.5	0	30.5
24/8/60	0	0	0	0	0	0	15.6	0	15.6
25/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/8/60	0.1	1	0	0	0	0	0	17	18.1
27/8/60	105	8.7	0	0	0	0	0	11.6	125.3
28/8/60	4.2	1	0	0	0	0	0	2	7.2
29/8/60	2.6	0.9	0.4	1.2	0.5	0.1	0	0	5.7
30/8/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/8/60	5	0	0	0	0	0	0	0	5

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0.4
2/9/60	0.5	0	0	0	0	0	11.6	0	12.1
3/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/9/60	0	34.2	0	0	0	0	0	0	34.2
6/9/60	22.3	3.3	0	0	61	15.4	0	0	102
7/9/60	0	4.5	5.7	1.8	0	0	0	0	12
8/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/9/60	0	0	0	0	0	22.5	0	0	22.5
11/9/60	0	0	0	0	0	0	0	1.3	1.3
12/9/60	0.5	0	0	0	0	4.5	0	0	5
13/9/60	0	0	0	0	0	22.7	0	0	22.7
14/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/9/60	0	0	0	0	0	0	0	46.3	46.3
16/9/60	0	0	0	0	0	0	0	1.6	1.6
17/9/60	0	0	0	0.1	0.8	0.7	0	0	1.6
18/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/9/60	0	0	0	0	2.5	7.8	0	0	10.3
21/9/60	0	2.3	0	0	0	0	0	49	51.3
22/9/60	0	0	0	0	0	1.7	0	0	1.7
23/9/60	0	0	0	0	0	2.4	43	2	47.4
24/9/60	0	0	0	0	0	0	0	1.8	1.8
25/9/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/9/60	0	6.6	0	0	0	0	0	0	6.6
27/9/60	13.5	0	0	0	0	0	0	0	13.5
28/9/60	0	0	0	0	0	0	0	31.2	31.2
29/9/60	13.1	0.4	5.3	0	0	0	0	0	18.8
30/9/60	0	1.5	0	0	0	0	0	0	1.5

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/10/60	0	0	0	0	12.3	0	0	0	12.3
2/10/60	0	0	0	0	24.2	0	0	2.5	26.7
3/10/60	0	0	0	0	2.7	11.1	0	0.4	14.2
4/10/60	1	0	0	0	0	0	12.3	0	13.3
5/10/60	0	0	17.8	0	0.9	0	0	0	18.7
6/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/10/60	0	0	0	0	0	12.4	0	0	12.4
8/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.6
10/10/60	13.1	0	0	0	0	0	0	0	13.1
11/10/60	0	0	0.5	0	19	0	0	0	19.5
12/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/10/60	0	0	0	0	21.5	0	0.7	0	22.2
14/10/60	20.6	120.5	25	0	0	0	0.9	2.3	169.3
15/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/10/60	0	0	0	0	0	0	0	49	49
17/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/10/60	0	0	0	0	4	10.1	0	0	14.1
19/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/10/60	1.3	0	0	0	0	0	0	0	1.3
21/10/60	0	0	0	0	1.4	53.1	0	0	54.5
22/10/60	55.8	3.3	1.8	0.1	0	0	0	0	61
23/10/60	0	9.3	0.5	0	0	0	0	0	9.8
24/10/60	24.2	3.8	0	1.2	2.1	0	12.3	5.4	49
25/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/10/60	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0.3
27/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/10/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/11/60	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0.2
6/11/60	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.1
7/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/11/60	0	0	0	0	5.9	1.9	0	0	7.8
12/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/11/60	0	0	0	0	0	0	2.8	0	2.8
17/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/11/60	0	0	0	0	0	0	4.7	0	4.7
20/11/60	2.3	3.1	0	0.6	0	0	24	0	30
21/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/11/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร

วันที่	เวลาที่ทำการตรวจ								รวม
	01.00	04.00	07.00	10.00	13.00	16.00	19.00	22.00	
1/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13/12/60	0	0	0	0	0	2.3	2	0	4.3
14/12/60	0	0	0	0	0	30.2	0	0	30.2
15/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16/12/60	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0.3
17/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/12/60	0	0	0.1	0.2	0	0	2.2	1	3.5
27/12/60	4.5	3	1.9	0.7	1.3	0.9	0	1.1	13.4
28/12/60	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0.8
29/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31/12/60	0	0	0	0	0	0	0	0	0

หน่วย: มิลลิเมตร



ตัวอย่างการคำนวณระบบกักเก็บน้ำฝนขนาดความจุ 10 ลูกบาศก์เมตร ในวันที่ 1 กันยายน พ.ศ.2560 – 2 กันยายน พ.ศ. 2560 โดยที่อาคารมีพื้นที่หลังคารับน้ำ 1,542 ตารางเมตร และอัตราความต้องการน้ำ 6.77 ลูกบาศก์เมตร/วัน สามารถคำนวณได้ดังนี้

วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 มีปริมาณฝน 0.4 มิลลิเมตร ตกลงสู่หลังคาอาคารมีพื้นที่รับน้ำ 1,542 ตารางเมตร สามารถคำนวณปริมาณน้ำฝนได้จากสมการที่ 3.1 ดังนี้

$$V = \frac{0.4 \text{ (mm)} \times 1,542 \text{ (m}^2\text{)}}{1,000 \text{ (mm/m)}}$$

$$V = 0.62 \text{ m}^3$$

ดังนั้นปริมาณน้ำฝนของวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 คือ 0.62 ลูกบาศก์เมตร และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความจุถังเก็บน้ำ (มีความจุว่างอยู่ 10 ลูกบาศก์เมตร) พบว่าสามารถเก็บน้ำฝนได้ทั้งหมดและเป็นการลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำและนำไปใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปา

เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราความต้องการน้ำ 6.77 ลูกบาศก์เมตร/วัน พบว่าสามารถนำน้ำฝนที่กักเก็บได้มาใช้ประโยชน์ทดแทนได้ 0.62 ลูกบาศก์เมตร น้ำฝนจึงหมดถังซึ่งถังเก็บน้ำจะมีความจุว่างอยู่ 10 ลูกบาศก์เมตร สำหรับรองรับน้ำฝนในวันถัดไป

วันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2560 มีปริมาณฝน 12.1 มิลลิเมตร ดังนั้นจะมีปริมาณน้ำฝนตกลงสู่หลังคารับน้ำ 18.66 ลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความจุถังเก็บน้ำจากวันก่อนหน้า พบว่าสามารถเก็บน้ำฝนไว้ได้ 10 ลูกบาศก์เมตร และเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ทดแทนน้ำประปาจำนวน 6.77 ลูกบาศก์เมตรแล้วจะมีปริมาณน้ำฝนคงเหลือในถัง 3.23 ลูกบาศก์เมตรซึ่งจะสามารถรองรับน้ำฝนในวันถัดไปได้อีก 6.77 ลูกบาศก์เมตร

รวม 2 วัน สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำได้ 10.62 ลูกบาศก์เมตร และลดปริมาณการใช้น้ำประปาได้ 7.39 ลูกบาศก์เมตร



ตัวอย่างการคำนวณหลังคาเขียวในวันที่ 1 กันยายน พ.ศ.2560 – 2 กันยายน พ.ศ. 2560 โดยที่อาคารมีพื้นที่หลังคาเขียว 1,542 ตารางเมตร สามารถคำนวณได้ดังนี้

วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 มีปริมาณฝน 0.4 มิลลิเมตร ตกลงสู่หลังคาอาคารมีพื้นที่หลังคาเขียว 1,542 ตารางเมตร ซึ่งจากตารางที่ 3.1 เมื่อปริมาณฝน 0.4 มิลลิเมตร หลังคาเขียวจะสามารถกักเก็บน้ำฝนได้ร้อยละ 100 ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาตรน้ำฝนที่กักเก็บได้จากสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$V = \left(\frac{0.4 \text{ (mm)} \times 1 \times 1,542 \text{ (m}^2\text{)}}{1,000} \right)$$

$$V = 0.62 \text{ m}^3$$

ดังนั้นวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำได้ 0.62 ลูกบาศก์เมตร

วันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2560 มีปริมาณฝน 12.1 มิลลิเมตร ซึ่งจากตารางที่ 3.1 เมื่อปริมาณฝน 12.1 มิลลิเมตร หลังคาเขียวจะสามารถกักเก็บน้ำฝนได้ร้อยละ 72.4 ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาตรน้ำฝนที่กักเก็บได้จากสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$V = \left(\frac{12.1 \text{ (mm)} \times 0.724 \times 1,542 \text{ (m}^2\text{)}}{1,000} \right)$$

$$V = 13.51 \text{ m}^3$$

ดังนั้นวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2560 สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำได้ 13.51 ลูกบาศก์เมตร

รวม 2 วัน สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำได้ 14.13 ลูกบาศก์เมตร



ตัวอย่างการคำนวณคอนกรีตพูนในวันที่ 1 กันยายน พ.ศ.2560 – 2 กันยายน พ.ศ. 2560 โดยที่ลานจอดรถยนต์มีพื้นที่คอนกรีตพูน 200 ตารางเมตร สามารถคำนวณได้ดังนี้

วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 มีปริมาณฝน 0.4 มิลลิเมตร ตกลงสู่ลานจอดรถยนต์มีพื้นที่คอนกรีตพูน 1,542 ตารางเมตร ซึ่งคอนกรีตพูนมีความสามารถในการระบายน้ำสูงกว่าความเข้มฝน ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาตรน้ำฝนได้จากสมการที่ 3.13 ดังนี้

$$V = \left(\frac{0.4 \text{ (mm)} \times 200 \text{ (m}^2\text{)}}{1,000} \right)$$

$$V = 0.08 \text{ m}^3$$

ดังนั้นวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2560 สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำได้ 0.08 ลูกบาศก์เมตร

วันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2560 มีปริมาณฝน 12.1 ดังนั้นสามารถคำนวณปริมาตรน้ำฝนได้จากสมการที่ 3.13 ดังนี้

$$V = \left(\frac{12.1 \text{ (mm)} \times 200 \text{ (m}^2\text{)}}{1,000} \right)$$

$$V = 2.42 \text{ m}^3$$

ดังนั้นวันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2560 สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำได้ 2.42 ลูกบาศก์เมตร

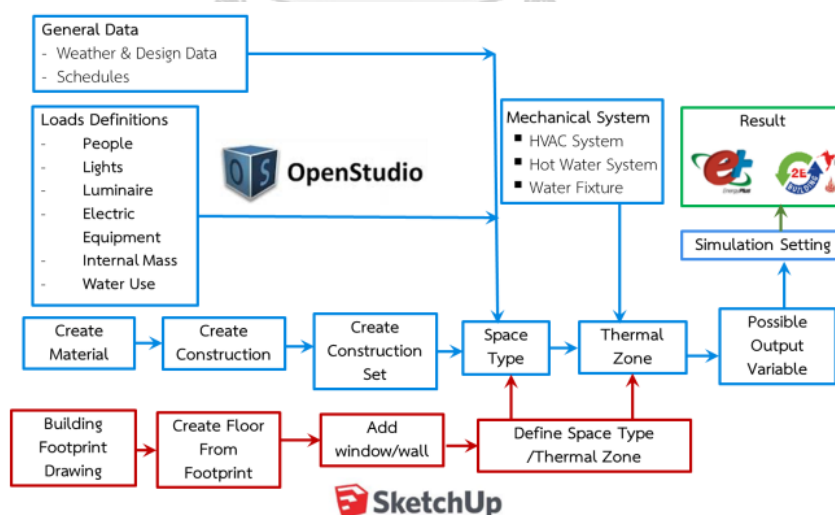
รวม 2 วัน สามารถลดปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงท่อระบายน้ำได้ 2.50 ลูกบาศก์เมตร



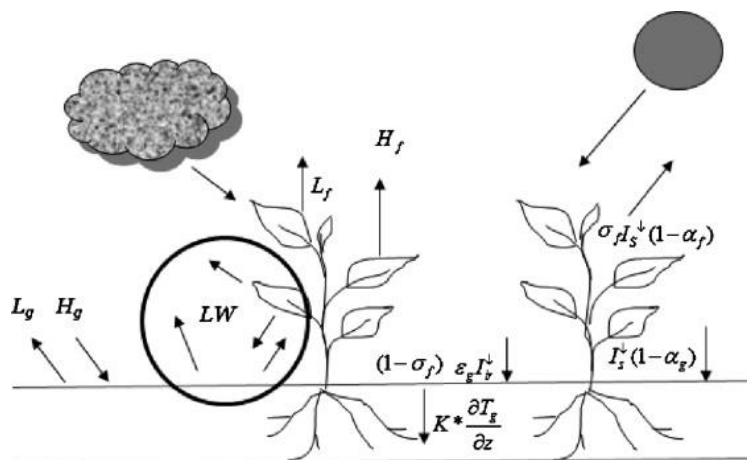
โปรแกรม Building Energy Simulation Model (BESM) แบ่งขั้นตอนทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ทำงานบนโปรแกรม SketchUp และส่วนที่ทำงานบนโปรแกรม OpenStudio ดังนี้

▪ **ส่วนที่ 1 การสร้างแบบจำลองจาก OpenStudio SketchUp Plug-in** - เป็นการสร้างรูปแบบของกรอบอาคาร โดยกำหนดประเภทของอาคาร, ลักษณะภูมิอากาศ (Weather Data), พื้นที่ใช้งาน (Space Types), โซนอุณหภูมิ (Thermal Zone) ซึ่งข้อมูลของแบบจำลองจะเชื่อมโยงกับส่วน OpenStudio Application

▪ **ส่วนที่ 2 กรอกรฐานข้อมูลอาคารใน OpenStudio Application** - ภายหลังจากสร้างแบบจำลองอาคาร แบบจำลองอาคารที่สร้างขึ้นใน OpenStudio SketchUp Plug-in จะถูกความร้อนเข้าสู่ OpenStudio Application เพื่อให้ผู้ใช้ทำการกรอกข้อมูลรายละเอียดของอาคารได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของที่ตั้งอาคาร (Site), รายละเอียดตารางเวลาการทำงาน (Schedules), โครงสร้างวัสดุสำหรับกรอบอาคาร (Constructions), ภาระความร้อน (Loads), พลังงานทดแทน (Renewable Energy), ประเภทของพื้นที่ใช้งาน (Space Types), Building Stories, ข้อมูลรวมของอาคาร (Facility), โซนอุณหภูมิ (Thermal Zone), ข้อมูลระบบปรับอากาศ (HVAC System), การตั้งค่าการแสดงผล (Output Variables), การตั้งค่าการประมวลผล (Simulation Settings) จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลสมรรถนะด้านพลังงานของอาคาร โดยผู้ใช้สามารถเลือกรูปแบบการประมวลผลได้ 2 ทางเลือกคือ BEC (Building Energy Code) หรือ Energy Plus



รูป จ.1 การไหลของการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม OpenStudio



รูปที่ จ.2 แบบจำลองสมดุลพลังงานของหลังคาเขียว

ที่มา: (Sailor, D.J., 2008)

สมดุลพลังงานในชั้นใบ

$$F_f = \sigma_f [I_s^{\downarrow} (1 - \alpha_f) + \epsilon_f I_{ir}^{\downarrow} - \epsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

สมการที่ จ.1

และ σ_f เป็นฟังก์ชันของ LAI:

$$\sigma_f = 0.9 - 0.7 \exp(-0.75 \text{LAI})$$

สมการที่ จ.2

สมดุลพลังงานในชั้นดิน

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s^{\downarrow} (1 - \alpha_g) + \epsilon_g I_{ir}^{\downarrow} - \epsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \times \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

สมการที่ จ.3

โดยที่

F_f คือ net heat flux to foliage layer (W/m^2)

F_g คือ net heat flux to ground surface (W/m^2)

H_f คือ foliage sensible heat flux (W/m^2)

H_g คือ ground sensible heat flux (W/m^2)

I_s^{\downarrow} คือ total incoming short wave radiation (W/m^2)

I_{ir}^{\downarrow} คือ total incoming longwave radiation (W/m^2)

- L_f คือ foliage latent heat flux (W/m^2)
- L_g คือ ground latent heat flux (W/m^2)
- LAI คือ leaf area index (m^2/m^2)
- T_f คือ leaf temperature (Kelvin)
- T_g คือ ground surface temperature (Kelvin)
- α_f คือ albedo (short wave reflectivity) of the canopy
- α_g คือ albedo (short wave reflectivity) of ground surface
- ϵ_1 คือ $\epsilon_g + \epsilon_f - \epsilon_f \epsilon_g$
- ϵ_f คือ emissivity of canopy
- ϵ_g คือ emissivity of the ground surface
- σ คือ the Stefan-Boltzmann constant ($5.699 \times 10^{-8} W/m^2 \text{ } ^\circ K^4$)
- σ_f คือ fractional vegetation coverage





ตารางที่ ฉ.1 ต้นทุนระบบกักเก็บน้ำฝน

รายการ	หน่วย	ราคา (บาท/หน่วย)	ที่มา
1. ถังเก็บน้ำสแตนเลส ขนาดความจุ 5,000 ลิตร	ถัง	33,000	บริษัทบีพีแทงค์จำกัด www.bp-tanks.com
2. เครื่องกรองน้ำใช้	เครื่อง	8,900	หจก.ไทยวอเตอร์สโตร์ www.thaiwaterstore.com
3. ไส้กรองน้ำ PP	เครื่อง	200	บริษัทฟิลเตอร์ ซัพพลาย www.filtersupply.in.th
4. สารกรองคาร์บอน 25 ลิตร	เครื่อง	575	บริษัทป็อนเนสท์ www.dtsood.com

ตารางที่ ฉ.2 ต้นทุนคอนกรีตพูน

รายการ	หน่วย	ราคา (บาท/หน่วย)	ที่มา
1. ค่าบล็อกพูนสี่เหลี่ยม	ตร.ม.	481.5	OneStockHome Co., Ltd www.onestockhome.com
2. ค่าแรงรื้อถอนพื้น ค.ส.ล.	ตร.ม.	50	http://design.obec.go.th
3. ค่าแรงปูพื้น	ตร.ม.	50	บัญชีราคากลางค่าแรงปูพื้น
4. ค่าหิน/กรวด	ตร.ม.	45	บริษัทท่าทราย แซนด์สยาม http://www.sandsiam.com
5. ค่าบำรุงรักษาต่อปี	ตร.ม.	14.16	(Uda, M. และคณะ, 2013)
6. ค่าบำรุงรักษาใหญ่	ตร.ม.	438.55	

ตารางที่ ฉ.3 ต้นทุนถังเก็บน้ำใต้ดิน

ความจุ (ลูกบาศก์เมตร)	ราคา (บาท)	ที่มา
10	63,000	บริษัทเปรมดีปรีชาจำกัด
20	116,000	
30	170,000	
40	225,000	
50	287,000	
60	340,000	
70	449,000	

ตารางที่ ฉ.4 ต้นทุนหลังคาเขียว

รายการ	หน่วย	ราคา (บาท/หน่วย)	ที่มา
1. ค่าติดตั้ง	ตร.ม.	1,600	บริษัทดีวันจำกัด https://www.d1.co.th
2. ค่าบำรุงรักษาต่อปี	ตร.ม.	25.27	(Uda, M. และคณะ, 2013)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพารณ มั่นใจอังค์ เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน 2535 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

ผู้วิจัยได้เข้าร่วมงานประชุมทางวิชาการในระดับนานาชาติ The 9th International Conference on Material and Manufacturing Technology (ICMMT 2018) ณ เมืองมอสโก ประเทศรัสเซีย โดยนำเสนอบทความในหัวข้อเรื่อง Assessing potential of rainwater harvesting: Case study building in Bangkok



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY