บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึง การควบคุมคุณภาพถนนคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท การประเมินกำลังอัดของถนนคอนกรีตตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Rebound Hammer การวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้อง การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาท ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก ระบบอนุมานฟัซซี่บนพื้นฐานแบบปรับตัวได้ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การควบคุมคุณภาพถนนคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท

กรมทางหลวงหลวงชนบท (2553) การควบคุมคุณภาพถนนคอนกรีต คอนกรีตจะเทลงบนชั้นพื้นทางจะต้องตรวจสอบให้ถูกต้องตามลาดผิวทางและค่าระดับดังที่แสดงในแบบแปลน โดยใช้แบบวัดชนิดเป็นซี่วิ่งไปบนแบบหล่อถ้ากรณีจำเป็นวัสดุชั้นพื้นทางจะต้องเอาออกหรือเพิ่มเติมเข้าไป เพื่อให้ระดับของพื้นทางทุกส่วนถูกต้องตามต้องการเสร็จแล้วบดอัดให้แน่นทั่วตลอดและตรวจสอบใหม่อีกครั้ง ผู้รับจ้างจะต้องไม่เทคอนกรีตส่วนใดๆ บนชั้นพื้นทางโดยที่ยังไม่ได้รับการตรวจสอบและเห็นชอบจากผู้ควบคุมงาน ถ้าพื้นทางได้รับการรบกวนจนเสียหายภายหลังจากที่ยอมรับแล้วจะต้องตบแต่งให้เข้ารูปและอัดแน่นใหม่อีกครั้ง ชั้นพื้นทางที่เสร็จเรียบร้อยแล้วจะต้องเรียบอยู่ในสภาพอัดแน่นขณะเทคอนกรีตและจะต้องไม่เทคอนกรีตใดรอบๆ โครงสร้างทางจนกว่าตัวโครงสร้างทางจะก่อสร้างถูกต้องตามระดับและแนวที่ต้องการหรือจนกว่าจะวางวัสดุใส่รอยต่อเพื่อขยายรอบโครงสร้างนั้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว นอกจากรถบรรทุกผสมคอนกรีตรถบรรทุกติดถังกวนหรือเครื่องจักรที่ใช้ขนส่งอื่นๆ ที่ได้รับความเห็นชอบจากผู้ควบคุมงานจะต้องติดตั้งเครื่องระบายคอนกรีตโดยปราศจากการแยกตัวของวัสดุคอนกรีตจะต้องเทลงในถังใส่คอนกรีตที่สามารถยกขึ้นได้เหนือชั้นพื้นทางและจากนั้นค่อยๆ เทคอนกรีตลงเพื่อป้องกันการแยกตัวหรือเกิดการอัดแน่นของวัสดุเสียก่อน

พื้นผิวที่พึงประสงค์หลังคอนกรีตแข็งตัวเพียงพอแล้วผิวหน้าจะต้องทดสอบต่อไปอีกเพื่อความถูกต้อง เมื่อทดสอบในแนวยาวแล้วระดับของผิวทางเบี่ยงเบนไปจากแนวระนาบเกิน 3.5 มิลลิเมตร แต่ไม่เกิน 7 มิลลิเมตร จะต้องทำเครื่องหมายไว้และขัดออกด้วยเครื่องจัดพื้นที่เห็นชอบแล้วจนกระทั่งความเบี่ยงเบนเหลือไม่เกิน 3.5 มิลลิเมตร

2.2 การประเมินกำลังอัดของถนนคอนกรีตตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงชนบท

เอกสารการประกวดราคาจ้าง ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ (2558) กำลังอัดของคอนกรีต ขณะเทคอนกรีตจะต้องเก็บตัวอย่างชนิดแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ทดสอบตามวิธีการทดสอบของ มทช.101-2545 กำลังของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์จะต้องไม่ต่ำกว่า 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุ 28 วัน ถ้ากำลังอัดต่ำสุดของแท่งคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์น้อยกว่าเกณฑ์กำหนด 325 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผู้ว่าจ้างอาจจะขอเจาะทดสอบในตำแหน่งที่คัดเลือกจากวิศวกรของผู้ว่าจ้างโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากผู้ว่าจ้าง นำตัวอย่างที่ได้จากการเจาะไปทดสอบตามวิธีการทดสอบของ AASHTO T22 กำลังอัดที่ยอมรับได้จะต้องไม่ต่ำกว่าเกณฑ์กำหนด 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุ 28 วัน คูณด้วย 0.83 ตัวอย่างที่เจาะจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดไม่น้อยกว่า 3 นิ้ว และมีอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2:1

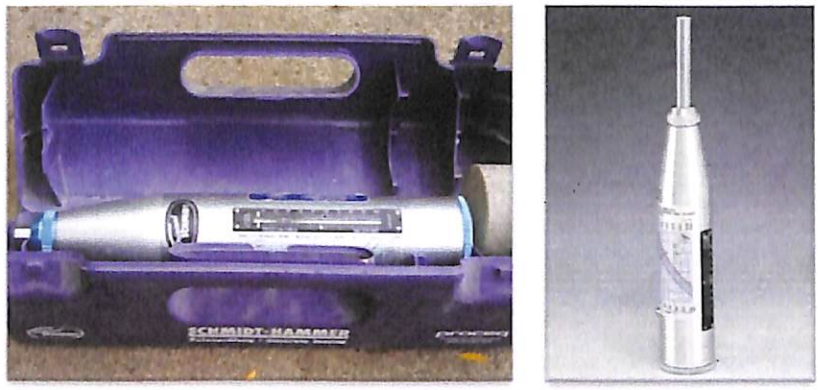
2.3 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Rebound Hammer

สำนักส่งเสริมบริการวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2557) การตรวจสอบเพื่อประเมินกำลังอัดของคอนกรีตโดย Rebound Hammer เป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test) โดยอาศัยหลักการกระแทกและกระดอนกลับของมวลสปริง (Spring Mass) ค่า Rebound Number ที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งของผิวที่ถูกกระแทก ทั้งนี้คอนกรีตที่จะการทดสอบด้วย Rebound Hammer ต้องมีผิวเรียบสม่ำเสมอและมีความหนาไม่น้อยกว่า 10 ซม.

การทดสอบด้วยวิธีการนี้ใช้กันมากในปัจจุบันเพราะสะดวก รวดเร็ว และสามารถนำผลการทดสอบมาประเมินกำลังรับแรงอัดของวัสดุในเบื้องต้นได้ทันที เพื่อกำหนดวิธีการทดสอบอื่นๆ เพิ่มเติมในภายหลัง

การทดสอบด้วยวิธีนี้จะต้องทำตามข้อกำหนดมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM C 805) โดยกำหนดให้นำหัว Plunger ของ Rebound Hammer สัมผัสกับพื้นผิวของคอนกรีตและกดแท่งแกนเหล็กให้สุดปลายของ Plunger กระทั่งเกิดเสียงกระแทกภายใน Rebound Hammer และอ่านค่า Rebound Number ซึ่งค่าที่อ่านได้ จะมีความสัมพันธ์กับค่า Compressive Strength ของคอนกรีต

เครื่องมือทดสอบประกอบด้วย Digital Concrete Test Hammer ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พลังงานในการกระแทก (Impact Energy) ต่อครั้งเท่ากับ 0.225 kg.m. สามารถตรวจสอบกำลังอัดของคอนกรีตได้ระหว่าง 100 ถึง 600 kgf/cm^2 (ksc)



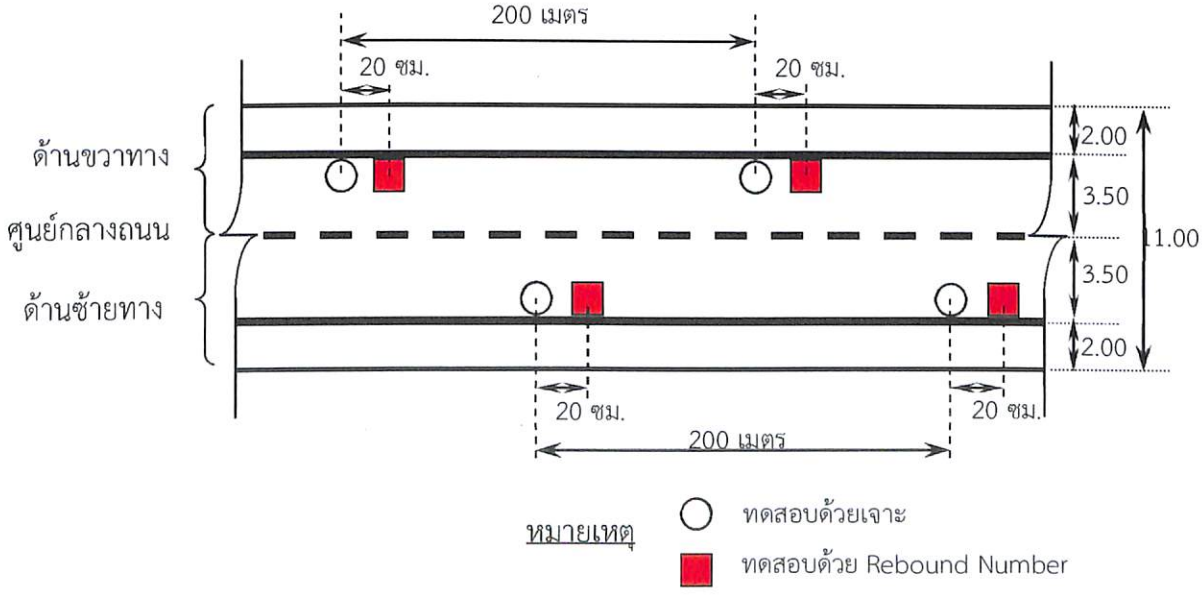
รูปที่ 2.1 แสดงเครื่องมือ Rebound Hammer ที่ใช้ในการทดสอบ

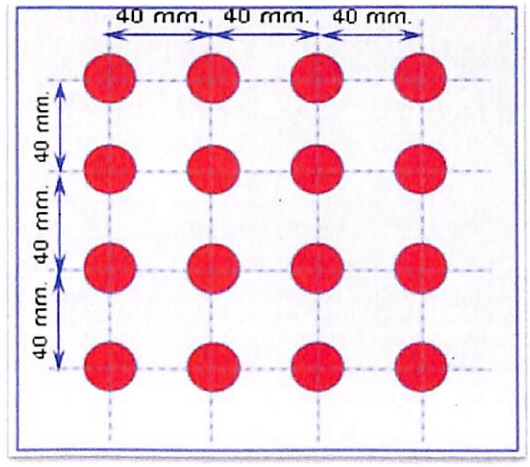
ที่มา : สำนักส่งเสริมบริการวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักก่อสร้างและบูรณะ สำนักโยธา กรุงเทพมหานคร

วิธีการทดสอบ

1. ตรวจสอบสภาพพื้นผิวที่จะทำการตรวจสอบโดยพื้นผิวที่ทำการทดสอบต้องขัดให้เรียบ เนื่องจากพื้นผิวที่โค้งนูนจะให้ค่า Rebound Number ต่ำกว่าและพื้นผิวที่เว้าจะให้ค่า Rebound Number สูงกว่า

2. กำหนดตำแหน่งทดสอบ 16 จุดซึ่งแต่ละจุดรูปที่ 2.2



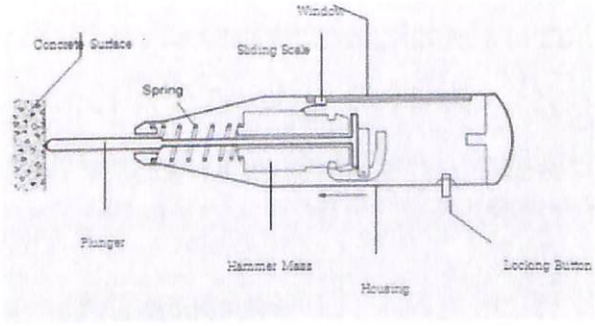


รูปที่ 2.2 ตำแหน่งทดสอบด้วย Rebound Hammer 16 จุด

ที่มา : สำนักส่งเสริมบริการวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักก่อสร้างและบูรณะ สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร

3. ทำการทดสอบด้วย Rebound Hammer ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวที่ทำการทดสอบ พร้อมบันทึกค่า Rebound Number ในการทดสอบจะต้องกดให้หัว Plunger ของ Rebound Hammer กระแทกกับพื้นผิวของคอนกรีตทดสอบจนสุดปลาย Plunger กระทั่งเกิดเสียงกระแทกภายใน Rebound Number ขึ้น

4. เฉลี่ยค่า Rebound Number ทั้ง 16 ค่าและตรวจสอบค่า Rebound Number ทุกค่าต้องแตกต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกินกว่า $\pm$ 7 หากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมีค่า Rebound Number แตกต่างจากค่าเฉลี่ยมากกว่า $\pm$ 7 จะถือว่าข้อมูลของค่า Rebound Number ที่ได้จากการทดลองครั้งนั้นไม่สามารถนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลได้ จะต้องทำการทดสอบใหม่เพิ่มเติม โดยต้องเปลี่ยนพื้นผิวที่ทำการทดสอบใหม่ และห่างจากตำแหน่งที่ได้ทำการทดสอบไปแล้วอย่างน้อย 30 มม. จนกว่าทุกค่าไม่เกินกว่าค่าเฉลี่ย $\pm$ 7

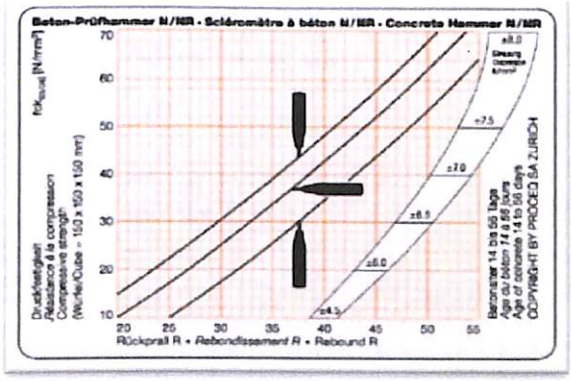


รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานของเครื่องมือ

ที่มา : สำนักส่งเสริมบริการวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักก่อสร้างและบูรณะ สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร

รูปที่ 2.4 แสดงการกำหนดตำแหน่งทดสอบ

5. นำค่าเฉลี่ยของ Rebound Number และทิศทางที่ใช้ในการทดสอบมาแปลงเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) ดูรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงตาราง Rebound Number

ที่มา : สำนักส่งเสริมบริการวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักก่อสร้างและบูรณะ สำนักการโยธา กรุงเทพมหานคร

2.4 การวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC)

พิษณุ ฟองศรี (2554) การวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องความเห็นและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC) ระหว่างการก่อสร้างกับปัจจัยของคอนกรีตงานถนนในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งมีเกณฑ์การให้คะแนนในแต่ละข้อคำถาม ดังนี้

- ผู้เชี่ยวชาญให้ความเห็นในช่องเหมาะสม = 1 คะแนน
- ผู้เชี่ยวชาญให้ความเห็นในช่องไม่เหมาะสม = -1 คะแนน

- ผู้เชี่ยวชาญให้ความเห็นในช่องไม่แน่ใจ = 0 คะแนน

การพิจารณาผลการประเมินค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) จะพิจารณาค่าตั้งแต่ 0.50 – 1.00 นำไปใช้งานและค่าต่ำกว่า 0.50 จะต้องถูกตัดออก ดังตัวอย่าง**ตารางที่** 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง

ปัจจัย	คะแนนความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ								รวม	ค่า IOC (ΣR)
	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5	คนที่ 6	คนที่ 7	คนที่ 8		
ระยะทางในการเทคอนกรีต	0	1	-1	1	0	1	1	1	4	0.50
ระยะทางในการขนส่งคอนกรีต	-1	0	0	1	0	1	0	1	2	0.40

ผลการตรวจสอบความเห็นผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 8 คน ปรากฏว่ามีผู้เชี่ยวชาญเห็นด้วยกับข้อความในคำถาม (ปัจจัยของระยะทางในการเทคอนกรีตกับระยะทางในการขนส่งคอนกรีต) จำนวน 5 คน ตอบว่าเหมาะสม จำนวน 1 คน ตอบว่าไม่เหมาะสมและจำนวน 2 คน ตอบว่าไม่แน่ใจ ผลรวมของคะแนนพิจารณา (ΣR) จะได้เท่ากับ 0.56 ดังนั้นค่า IOC หาได้จาก

$$IOC = 4/8$$

$$= 0.50$$

ค่า IOC เท่ากับ 0.50 แสดงถึงความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ มีความสอดคล้องกัน เนื่องจากอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (0.50 – 1.00) ถ้าคำถามมีความเที่ยงตรง คือมีค่าตั้งแต่ 0.50 ขึ้นไปหากมีค่าน้อยกว่า 0.50 ถือว่าคำถามข้อนั้นไม่มีความสอดคล้อง

2.5 เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยดาต้าไมน์นิ่ง

เอกสิทธิ์ พัชรวงศ์ศักดา (2557) เทคนิคการวิเคราะห์ดาต้าไมน์นิงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) และ
- การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning)

2.5.1 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนจะอาศัยชุดข้อมูลเข้าเพียงอย่างเดียวในการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียมโดยไม่มีข้อมูลเป้าหมาย แต่จะได้ข้อมูลออก (Output Data) จากโครงข่ายประสาทเทียมแทนเมื่อข้อมูลเข้าสู่ประสาท โครงข่ายประสาทจะคำนวณค่าความสัมพันธ์ที่มีอยู่ภายในกลุ่มข้อมูลเข้า โดยอาศัยค่าถ่วงน้ำหนักเป็นตัวแยกความแตกต่างของข้อมูลเข้าและนำไปเก็บไว้ในโหนดข้อมูลออกของโครงข่ายประสาท ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการจำแนกชุดข้อมูล (Classification)

2.5.2 การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) เทคนิคในประเภทนี้จะเน้นการเรียนรู้จากข้อมูลที่มีอยู่ในอดีต เพื่อนำมาสร้างโมเดลสำหรับทำนายหรือคาดการณ์สิ่งที่เกิดขึ้นในอนาคต โมเดลนี้อาจจะเป็นสมการทางคณิตศาสตร์หรือกฎต่างๆ ก็เป็นได้ การเรียนรู้แบบมีผู้สอนจะกำหนดข้อมูลฝึกหัด (Training data set) ให้กับโครงข่ายประสาท ซึ่งกลุ่มนี้ประกอบด้วยข้อมูลเข้า (Input Data) และข้อมูลเป้าหมาย (Target Data) ที่ต้องการจากนั้นโครงข่ายประสาทจะทำการคำนวณค่าน้ำหนักที่เหมาะสมให้กับข้อมูลฝึกหัด โดยคำตอบที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกคำนวณค่าความผิดพลาด (Error Value) ว่ามีความห่างจากคำตอบที่ต้องการของข้อมูลนำเข้าในชุดเดียวกันมากน้อยเพียงใด ถ้ายังมีความผิดพลาดสูงอยู่ การฝึกหัดจะดำเนินต่อไปจนกว่าค่าความผิดพลาดจะลดลงต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ (Accept Level) จึงจะหยุดฝึกหัด สุดท้ายค่าน้ำหนักที่ได้จะเป็นฟังก์ชั่นที่ใช้ในการแปลงข้อมูล

2.6 การกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาท

จำนวนโหนดในชั้นข้อมูลเข้าโดยทั่วไปจะเท่ากับจำนวนตัวแปรอิสระ ในที่นี้ตัวแปรอิสระมี 4 ตัว คือ ระยะทางในการเทคอนกรีต สภาพอากาศขณะเทคอนกรีต วิธีการบ่มคอนกรีต และ ระดับการควบคุมงาน ดังนั้นจำนวนโหนดในชั้นข้อมูลเข้า คือ 4 โหนด จำนวนโหนดในชั้นข้อมูลออกเท่ากับจำนวนคำตอบมี 1 คำตอบคือ กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) ในที่นี้กำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนยังไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน โดยทั่วไปจำนวนโหนดในชั้นซ่อนจะได้จากการทดลอง สำหรับการกำหนดจำนวน

โหนดในชั้นซ่อนจะใช้ Baum-Haussle rule ซึ่งเสนอไว้เมื่อปี ค.ศ. 1998 เพื่อใช้ในการกำหนดจำนวนโหนดชั้นซ่อน โดยคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$n_{hidden} \leq n_{h\ max} = \frac{n_{data\ set} \times n_{input}}{n_{data\ set} + n_{input}}$$

โดยที่ n_{hidden} คือ จำนวนโหนดในชั้นซ่อน

$n_{h\ max}$ คือ จำนวนโหนดที่มากที่สุดในชั้นซ่อน

n_{input} คือ จำนวนโหนดในชั้นข้อมูลเข้า

n_{output} คือ จำนวนโหนดในชั้นข้อมูลออก

$n_{data\ set}$ คือ จำนวนโหนดในในการฝึกหัด

ในที่นี้ $n_{data\ set} = 14$, $n_{input} = 4$, และ $n_{output} = 1$ จำนวนโหนดมากที่สุดในชั้นซ่อนคือ

$$n_{hidden} \leq n_{h\ max} = \frac{n_{data\ set} \times n_{input}}{n_{data\ set} + n_{input}}$$

$$= \frac{14 \times 4}{4 + 1}$$

$$= 11.2 = 12$$

2.7 ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก (Membership function) เป็นฟังก์ชั่นที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอนและคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความน่าจะเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันทุกประการก็ได้

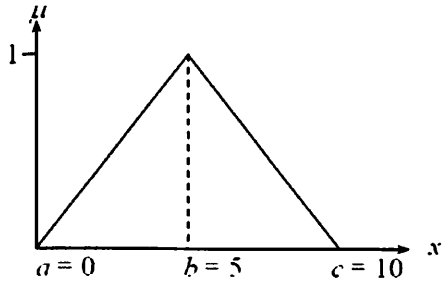
ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 3 ชนิดเท่านั้น ดังนี้

(ก.) ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular membership function)

ฟังก์ชันสามเหลี่ยมมีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์ คือ {a, b, c}

$$\text{triangular}(x:a,b,c)=\begin{cases} 0 & x<a \\ (x-a)/(b-a) & a \le x \le b \\ (c-a)/(c-b) & b \le x \le c \\ 0 & x>c \end{cases} \quad (1)$$

ตัวอย่างกำหนดให้ a เท่ากับ 0, b เท่ากับ 5 และ c เท่ากับ 10 แสดงกราฟฟังก์ชันสามเหลี่ยมดังรูปที่ 2-6



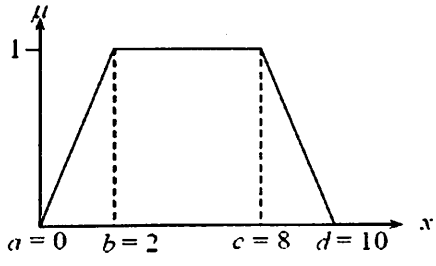
รูปที่ 2.6 กราฟของแต่ละชนิดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

(ข.) ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function)

ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูมีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ {a, b, c, d}

$$\text{trapezoidal}(x : a,b,c,d) = \begin{cases} 0 & x<a \\ (x-a)/(b-a) & a \le x \le b \\ 1 & b \le x \le c \\ (d-x)/(d-c) & b \le x \le d \\ 0 & x \ge d \end{cases} \quad (2)$$

ตัวอย่างกำหนดให้ a = 0, b = 2, c = 8 และ d = 10 แสดงกราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมูได้แสดงดังรูปที่ 2.7



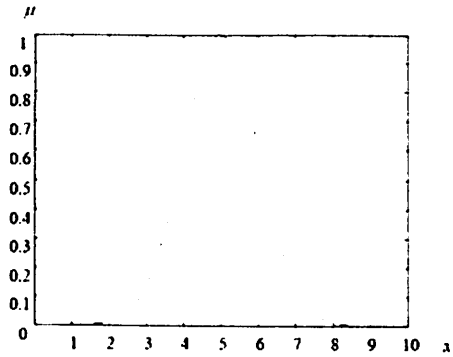
รูปที่ 2.7 กราฟฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู

(ค.) ฟังก์ชั่นเกาส์เซียน (Gaussian membership function)

ฟังก์ชันเกาส์เซียนมีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์ คือ {m, σ} ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ยและ σ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{gaussian}(x: m,\sigma) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

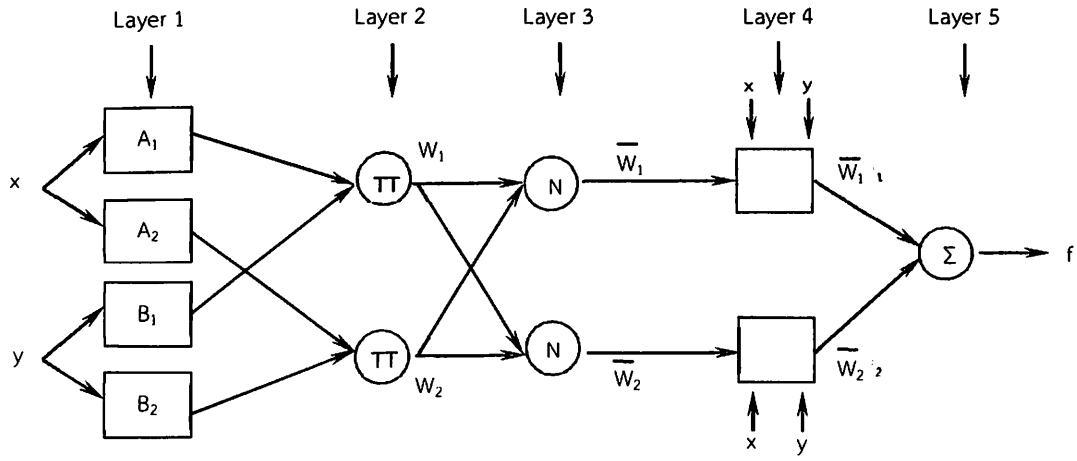
ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้ m = 5 และ σ= 1 ฟังก์ชันเกาส์เซียนแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันเกาส์เซียน

2.8 ระบบอนุมานฟัซซี่บนพื้นฐานแบบปรับตัวได้ (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System: ANFIS)

ระบบอนุมานฟัซซี่บนพื้นฐานแบบปรับตัวได้ (Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System: ANFIS) มีโครงสร้างตามรูปที่ 2.9 โดยโหนด (Node) ที่เป็นสี่เหลี่ยมหมายถึง โหนดที่มีพารามิเตอร์ที่ปรับได้ ส่วนโหนดที่เป็นวงกลมจะไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ได้



รูปที่ 2.9 สถาปัตยกรรมของระบบอนุมานฟัซซี่บนพื้นฐานโครงข่ายแบบปรับตัวได้

ในปี ค.ศ. 1997 Jang และปี ค.ศ. 1999 Jain และ Martin จากรูปที่ 2-12 แสดงตัวอย่างโครงสร้างง่ายๆ ของ ANFIS ที่ประกอบด้วยอินพุท 2 ตัวแปร คือ x, y และเอาท์พุท 1 ตัวแปรคือ z ประกอบด้วย 5 ชั้น (Layer) โดยมีหลักการดังนี้

ชั้นที่ 1 Antecedent Parameters

ทุกโหนด j ของชั้นนี้จะเป็นสี่เหลี่ยม หมายถึง พารามิเตอร์สามารถปรับได้ โดยมีฟังก์ชันโหนดเป็นที่ทำการหาค่าฟัซซี่ จากคริสป์ อินพุท (x) ผ่านทางฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{Ai}(x)$

$$O^1_j = \mu_{Ai}(x) \quad (4)$$

เมื่อ Q^1_j เป็นค่าความเป็นสมาชิกของพจน์ภาษา Ai โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก $\mu_{Ai}(x)$ อาจเป็นลักษณะฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ

$$\mu_{Ai}(x) = \frac{1}{1+\left\{\left\{\frac{x-ci}{a}\right\}^2\right\}^{bi}} \quad (5)$$

เมื่อ { a_i, b_i, c_i } เป็นเซตพารามิเตอร์ c_i เป็นค่ากลางของฟังก์ชั่น a_i และ b_i เป็นตัวกำหนดความเป็นสมาชิกของฟังก์ชัน ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอื่นๆ ที่สามารถหาค่าอนุพันธ์ได้ เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular membership function) ฟังก์ชั่นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal membership function)

ชั้นที่ 2 T-norm Operator

ฟังก์ชั่นของโหนดนี้เป็นแบบวงกลม หมายถึงไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ได้ โดยมีสัญลักษณ์เครื่องหมาย TT เป็นชั้นทำการเชื่อมโยงค่าฟัซซี่จากแต่ละมิติโดยคูณสัญญาณเข้าที่เป็นฟัซซี่เข้าด้วยกันและส่งค่าฟัซซี่ผลคูณเป็นสัญญาณออก

$$W_j = \mu_{j1}(x_1) \times \mu_{j2}(x_2), \; j = 1 \ldots L \quad (6)$$

เมื่อ W_j เป็นค่า firing strength จากกฎแต่ละข้อ และ $\mu_{ji}(x_i)$ เป็นค่าฟัซซี่จากมิติที่ i ของกฎข้อที่ j

ชั้นที่ 3 Normalize firing Strength

ฟังก์ชันของโหนดนี้เป็นแบบวงกลม สัญลักษณ์ของโหนดเป็นเครื่องหมาย N หมายถึงการทำ Normalize เป็นชั้นทำค่าฟัซซี่ผลรวมจากข้อตั้งทุกกฎให้เป็นหนึ่ง โดยค่าฟัซซี่จากกฎแต่ละข้อจะถูกหารด้วยผลรวมของค่าฟัซซี่จากทุกกฎ

$$\overline{W}_j = \frac{W_j}{W_1 + W_2 + \ldots + W_L}, \quad j = 1 \ldots L \tag{7}$$

ชั้นที่ 4 Consequent Parameters

เป็นชั้นพารามิเตอร์ข้อตามฟังก์ชันของโหนดนี้เป็นสี่เหลี่ยม พารามิเตอร์ r_{j0} , r_{j1} และ r_{j2} สามารถปรับค่าได้ สำหรับค่าเอาท์พุทจากชั้นนี้ได้จาก

$$O^4_j = \overline{W}_j y_j = \overline{W}_j (r_{j0} + r_{j1}x_1 + r_{j2}x_2) \tag{8}$$

ชั้นที่ 5 Overall Output

เป็นชั้นเอาท์พุทของโครงข่าย ฟังก์ชันของโหนดนี้เป็นแบบวงกลมพารามิเตอร์ของโหนดนี้จะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ทำหน้าที่รวมสัญลักษณ์ของโหนดเป็นเครื่องหมาย Σ เอาท์พุทของโหนดหาได้จาก

$$O^5_j = \overline{W}^T y = \sum_{j=1}^{L} \overline{W}_j \overline{y}_j = \frac{\Sigma_j W_j y_j}{\Sigma_j W_j} \tag{9}$$

เมื่อ $\overline{W}^T = [\overline{W}_1, \overline{W}_2, \overline{W}_3]$ เป็นค่าฟัซซี่ที่ผ่านวิธีนอมอลไลซ์ จากกฎข้อ 1 ถึง L และ

$y^T = [y_1, y_2, y_3]$.เป็นส่วนข้อตามของกฎข้อ 1 ถึง L

ระบบผสมผสานฟัซซี่และโครงข่ายประสาทเทียม ได้แก่ ระบบอนุมานฟัซซี่บนฐานโครงข่ายแบบปรับตัวได้ ANFIS ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาการไม่มีฟังก์ชันการเรียนรู้ด้วยตัวเอง ในระบบฟัซซี่และปัญหาของโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถอธิบายเหตุผลแบบกฎฟัซซี่ การผสมผสานกันระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและระบบฟัซซี่ จึงได้กำหนดในเบื้องต้นโดยผู้เชี่ยวชาญ และมีการปรับตัวเองได้จากการเรียนรู้โดยตรงจากข้อมูล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำระบบ ANFIS ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากปัจจัยต่าง ๆ ของโครงการ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ค้นคว้างานวิจัยที่ศึกษาการควบคุมคุณภาพถนนคอนกรีต การประเมินกำลังอัดคอนกรีต การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Rebound Hammer การวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม การกำหนดโครงสร้างของโครงข่ายประสาท ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก ระบบอนุมานฟัซซี่บนพื้นฐานแบบปรับตัวได้ โดยแยกเป็นงานวิจัยต่างประเทศและงานวิจัยภายในประเทศโดยเรียงลำดับตามปีที่เผยแพร่ไว้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1965 L.A.Zadeh ได้คิดค้น ทฤษฎี ฟัซซี่เซท (Fuzzy set) ขึ้นซึ่งเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับฟัซซี่เซทที่นิยามบนเอกภพสัมพัทธ์ (Universe of discourse: U) โดยฟัซซี่เซทสามารถมองเสมือนหนึ่งเป็นการขยายแนวคิดของเซททั่วไปหรือ คริสเซท (Crisp set) ให้กว้างขึ้นและคิดค้นและอาศัยฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) เพื่อสื่อถึงความไม่แน่นอน โดยในฟัซซี่เซตนี้จะกำหนดค่าความเป็นสมาชิก (Degree of membership) ให้ค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งแตกต่างจากเซตแบบฉบับ (Classic Set) ที่มีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกเพียงสองค่า คือ 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิก และ 1 หมายถึงเป็นสมาชิก การกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่สนใจต้องอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู ฟังก์ชันเกาส์เซียน เป็นต้น การเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะขึ้นอยู่กับข้อมูลของตัวแปรนั้นๆ

ในปี ค.ศ. 1986 Dubois ได้กล่าวถึงฟัซซี่ เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่สื่อความไม่แน่นอน (Uncertainty) ซึ่งในทฤษฎีเซทปกตินั้นสามารถแยกแยะได้ว่าตัวแปรใดเป็นหรือไม่เป็นสมาชิกของเซทนั้นๆ แต่มีหลายปัญหาที่ไม่สามารถจำแนกหรือกำหนดได้อย่างชัดเจนว่ามีค่าเป็นจริงหรือเท็จ ปัญหาเหล่านี้มักจะมีลักษณะที่มีความยุ่งยากหรือมีโครงสร้างที่ไม่ชัดเจนทำให้ยากในการตัดสินใจที่จะแก้ปัญหานั้นๆ โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ได้ การแก้ปัญหาจะเป็นลักษณะที่ต้องใช้มนุษย์ในการแก้มากกว่า แนวคิดนี้มีลักษณะภาษาที่คลุมเครือ เช่น ค่อนข้างถูก ค่อนข้างผิด เป็นต้น เป็นแนวคิดหรือลักษณะของการตัดสินใจแบบคลุมเครือหรือการตัดสินใจแบบฟัซซี่ ซึ่งหลักการนี้จะให้มนุษย์แสดงข้อสรุปหรือความเชี่ยวชาญออกมาได้

ในปี ค.ศ. 2002 Jong In Kim และ Doo Kie Kim ได้ศึกษา การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) สำหรับการประเมินกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วันของส่วนผสมต่างๆ ของบริษัทผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป ทั้ง 2 บริษัทแล้วนำมาเปรียบเทียบกับการทำนายด้วย ANN ผลที่ได้คือ ANN สามารถประเมินกำลังอัดของคอนกรีตมีความแม่นยำสูงมาก

ในปี ค.ศ. 2002 Jong In Kim และ Doo Kie Kim ได้ศึกษาเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการคาดการณ์ความคงทนต่อแรงบีบอัดของคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสม สำหรับการเตรียมความพร้อมและการทดสอบนั้น ข้อมูลถูกกำหนดโดยสัดส่วนการผสมที่ใช้ใน 2 บริษัทคอนกรีตสำเร็จรูป ดังนั้นค่าความคงทนต่อแรงบีบอัดที่ต้องการจะได้จากการณ์คาดคะเนจากการลองผิดลองถูกค่าการคาดคะเนความคงทนต่อแรงบีบอัดที่ถูกตรวจสอบแล้วจะถูกเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบในห้องแลบ ผลที่ได้คือโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีประสิทธิภาพมากในการคาดคะเนความคงทนแรงอัดของคอนกรีตด้วยความแม่นยำ

ในปี ค.ศ. 2014 Gökmen Tayfur Tahir Kemal Erdem และ Önder Kirca ได้ศึกษา การทำนายกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงด้วยตรรกะคลุมเคลือ (FL) และ โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) คอนกรีตกำลังอัดสูงจะมีคว่มแตกต่างกันซิลิก้าฟูมตั้งแต่ 0-15% ที่กำลังอัดที่ 3 7 และ 28 วัน ผลคือ FL ป้อนข้อมูลแค่ 3 ตัวแปรสามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงได้ดีกว่า ANN

ในปี ค.ศ. 2014 Gamze Dogan, Musa Hakan Arslan และ Murat Ceylan ได้ศึกษาการคาดคะเนคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต ปราศจากการก่อให้เกิดการแตกหัก โดยใช้วิธีทางเลือกใหม่ในบริบทนี้ใช้ 5 ปัจจัยหลัก (น้ำ/อัตรส่วนซีเมนต์, จำนวนซีเมนต์, แรงอัด, สารเสริม) 96 ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ภาพของตัวอย่างวัตถุได้ถูกถ่ายก่อนที่จะทำการทดสอบ ที่การทดสอบแรงกด การศึกษาและการทดสอบกระบวนการของ ANNและ IP รู้ได้จากการอ่านค่าแรงที่กดทับในห้องทดลอง นอกจากนี้ 96 คอนกรีตทรงกระบอกตัวอย่างนั้น ได้สุ่มเลือก 48ตัวอย่างให้ได้รับการตรวจสอบ ANN และ IP. จากทั้งสองตัวอย่าง การศึกษา/การทดสอบ, การตรวจสอบตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์สูงมาก ระหว่างผลลัพธ์ของ ANN และ IPและผลลัพธ์ที่แท้จริง ซึ่งความแตกต่างระหว่าง 97.18% และ 99.87%

ในปี พ.ศ. 2531 วินิตย์ ชลายนานนท์และสุววัฒน์ พาหุสวัณโณ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตและอายุคอนกรีต ที่อายุคอนกรีตต่างๆ กัน โดยผลที่ได้จากการศึกษาคือรูปแบบสมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมในการใช้งานและมีผลลัพธ์ของโครงการคือสมการความสัมพันธ์ที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ประกอบในการควบคุมงานก่อสร้างทางด้านโยธาและชลประทาน โดยสามารถประมาณประเมินค่ากำลังอัดของคอนกรีตของโครงสร้างขณะดำเนินการก่อสร้างได้ ทำให้การควบคุมงานก่อสร้างมีคุณภาพตามต้องการมีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น

ในปี พ.ศ. 2550 สราวุธ สร้อยเรืองศรี, ไพรัช วงศ์ยุทธไกรและโอภาส สุขหวาน ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กเสริม ระยะหุ้มเหล็กเสริม และปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตในมวลคอนกรีตเสริมเหล็ก กับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี คอนกรีต

เทส แฮมเมอร์ และเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทอสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Concrete Hammer Test บนมวลคอนกรีตที่มีลักษณะการเสริมเหล็กต่างๆ ในแต่ละปฏิภาคส่วนผสม (Mix design) ทั้ง 3 ส่วนผสมพบว่า ปริมาณเหล็กเสริมในมวลคอนกรีตเสริมเหล็กและระยะหุ้มเหล็กเสริมนั้น มีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดที่ได้จากกทดสอบแบบไม่ทำลาย

ในปี พ.ศ. 2553 พยุง มีสัจ ได้กล่าวถึง (แปล) ฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก (Membership function) เป็นฟังก์ชั่นที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอนและคลุมเครือ ดังนั้นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี่ เพราะรูปร่างของฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยฟังก์ชันความน่าจะเป็นสมาชิกจะไม่สมมาตรกันทุกประการก็ได้

ในปี พ.ศ. 2553 ศุภชัย สินถาวร ได้ศึกษา การประเมินกำลังของคอนกรีตด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยเครื่องมือรีบาวด์แฮมเมอร์ถูกคิดค้นมาตั้งแต่ทศวรรษ 1940 และยังคงได้รับความนิยมในปัจจุบัน เพื่อทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจถึงพื้นฐานของเครื่องมือ ตระหนักถึงข้อจำกัด และประเมินกำลังของคอนกรีตโดยรีบาวด์แฮมเมอร์ที่มีประสิทธิภาพ

ในปี พ.ศ. 2557 อภิชิต คำภาหล้า, โกสีห์ เทียมลมและจิระยุทธ สืบสุข ได้ศึกษา อิทธิพลของวิธีการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ผลของวิธีการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดและการประมาณค่าที่อายุบ่มใดๆ ผลจากการศึกษาแสดงค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทุกวิธีการบ่มมีค่าสูงขึ้นสัมพันธ์กับการลดลงของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และการเพิ่มขึ้นของอายุบ่ม