

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยคุณสมบัติการซึมได้และ CBR ของดินชั้นทางบดอัดผสมยางมะตอยและน้ำยางพารา เป็นการพัฒนาทดลอง (Experimental development) การวิจัยประยุกต์ (Applied research) เป็นการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาความรู้ใหม่ ๆ และมีวัตถุประสงค์เพื่อนำความรู้นั้น ไปใช้ประโยชน์อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือเป็นการนำเอาความรู้และวิธีการต่างๆ ที่ได้จากการวิจัยขั้นพื้นฐาน มาประยุกต์ใช้อีกต่อหนึ่ง หรือหาวิธีใหม่ ๆ เพื่อบรรลุเป้าหมายที่ได้ระบุไว้แน่ชัดล่วงหน้า จึงต้องทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วัสดุกันซึม Liner

- (1) ชั้นกันซึมธรรมชาติ (Natural Liners) เป็นชั้นดินเหนียวที่มีความหนามากพอจะสามารถใช้เป็นชั้นกันซึมธรรมชาติได้ โดยดินเหนียวมีขนาดเม็ดดินที่เล็กมากและมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ต่ำกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที (cm/s)
- (2) ชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด (Compacted Clay Liners) ดินเหนียวสามารถใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมได้อย่างดี ป้องกันการรั่วซึมของ Leachate และ Landfill gas
- (3) ชั้นกันซึมแบบจีโอเมมเบรน (Geomembrane Liners) เป็นชั้นที่ป้องกันการรั่วซึมของ Leachate และ Landfill gas วัสดุสังเคราะห์ (Synthetic materials) ที่เป็นโพลีเมอร์บางชนิดถูกนำมาใช้ในชั้นกันซึมในที่ฝังกลบมูลฝอย เพราะมีคุณสมบัติทึบน้ำ (Impervious) โพลีเมอร์ที่ใช้ในการทำชั้นกันซึม ได้แก่ High density polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP) และ Polyvinylchloride (PVC)
- (4) Geotextile (Nonwoven) เป็นชั้นกรอง และเพื่อป้องกัน Geomembrane
- (5) ชั้นกันซึมดินเหนียวจีโอสินธิติก (Geosynthetic Clay Liners, GCLs) GCLs เป็นวัสดุที่สร้างขึ้นเฉพาะเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบมูลฝอยโดยจะประกอบไปด้วย เบนโทไนท์ (Bentonite) ซึ่งเป็นดินเหนียวชนิดพิเศษที่มีค่าสัมประสิทธิ์ การยอมให้น้ำซึมผ่านที่ต่ำมาก (ประมาณ 1×10^{-8} ถึง 1×10^{-10} cm/s)
- (6) ชั้นกันซึมแบบผสม (Composite Liners) การใช้ชั้นกันซึมแบบผสม คือ ใช้ดินเหนียวบดอัดวางไว้ใต้จีโอเมมเบรน เพื่อให้สามารถป้องกันการเคลื่อนที่แบบการแพร่ที่ผ่านชั้นจีโอเมมเบรนได้

2.1.2 น้ำชะมูลฝอย (Leachate)

คือ ของเหลวที่ไหลซึมผ่านชั้นมูลฝอยและละลายเอามลสารจากมูลฝอยออกมาด้วย ขึ้นอยู่กับ ลักษณะสมบัติของมูลฝอย ระยะเวลาฝังกลบ และ ปริมาณของเหลวที่ซึมผ่านชั้นมูลฝอย

2.1.3 การควบคุมการไหลซึมของน้ำชะมูลฝอย

1. ปูชั้นกันซึม (Liner) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำชะมูลฝอยผ่านลงไปปนเปื้อนกับแหล่งน้ำ ผิวดินหรือน้ำใต้ดินเบื้องล่าง

2. ระบบรวบรวมน้ำชะมูลฝอย ทำหน้าที่เก็บรวบรวมน้ำชะมูลฝอย แล้วสูบขึ้นมาจาก สถานที่ฝังกลบเพื่อทำการบำบัดน้ำชะมูลฝอยให้เป็นน้ำดีต่อไป

3. ระบบปิดทับชั้นสุดท้าย ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำฝนซึมผ่านลงไปในพื้นที่ฝังกลบเพื่อ ลดโอกาสที่จะเกิดน้ำชะมูลฝอยในสถานที่ฝังกลบ

2.1.4 ยางพาราที่นำมาใช้เป็นวัสดุประสาน

ลักษณะของยางพาราที่ได้นำมาใช้มีลักษณะทางกายภาพคือ เป็นน้ำยางสีขาวขุ่นไม่ โปร่งแสง มีความเหนียว (แล้วแต่สูตรที่นำมาทดลอง) แต่จะไม่แห้งเมื่อเก็บไว้ที่ๆ ไม่โดนอากาศ เนื่องจากมีการเติมสารแอมโมเนีย เพื่อช่วยลดการแห้งตัวของยางพารา เมื่อเจอกับอากาศภายนอก ขั้นตอนในการทำยางพาราทำได้โดยนำน้ำยางพาราสมาทำการต้มในอุณหภูมิที่สูงหลังจากนั้นเติม สารแอมโมเนียและมีสารเคมีบางประเภทซึ่งหลังจากการเติมสารเคมีเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการ จัดเก็บอยู่ในเกลลอนถึงน้ำมัน โดยมีห้องในการจัดเก็บ เพื่อไม่ให้ยางพาราโดนความร้อนจาก แสงอาทิตย์โดยตรง ยางพาราที่นำมาผ่านการต้มและเติมสารเคมีบางประเภทลงไปแล้วนั้น จะมี คุณสมบัติพิเศษในการยึดเกาะมลสารได้มากขึ้น อีกทั้งยังมีความเหนียวและความยืดหยุ่นมากขึ้น และหากปล่อยให้ยางพาราที่ได้เกิดกระบวนการสันดาปกับอากาศจากภายนอก หรือนำออกตากแดด ยางพาราจะเกิดการแข็งตัว (rigid) และสามารถรองรับน้ำหนักที่กดทับลงมาได้มากขึ้น (โดยมีการใช้ ยางพาราที่ได้นี้มาทำเป็นถนนเพื่อใช้แทนยางมะตอยแล้วในหลายประเทศ เช่น เกาหลี เนื่องจากเป็น ทางเลือกที่ไม่ก่อให้เกิด มลพิษ (toxic) ระหว่างกระบวนการ เพราะสามารถหลีกเลี่ยงการใช้ ปิโตรเลียมอันก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศได้) อีกทั้งในประเทศไทยก็มีถนนยางพาราแล้วด้วยเช่นกัน [3] และด้วยการทดสอบจากห้องปฏิบัติการทดลองจึงทำให้ได้ยางพาราที่มีคุณสมบัติในการใช้งานที่มี ประสิทธิภาพในการใช้งานออกมา 3 ประเภทดังนี้

2.1.4.1 ยางพารา C45S เป็นยางพาราที่ได้จากการต้มยางพาราดิบ 45% และมีการใส่ แอมโมเนียช่วยในการคงสภาพความเป็นของเหลว รวมทั้งมีการใส่สารเคมีอีกบางชนิดเพื่อช่วยในเรื่อง ของคุณสมบัติในการเกาะยึด และความแข็งแรงของยางพาราเมื่อเจอกับอากาศภายนอก และเกิดการ แข็งตัวเป็นวัสดุแข็ง (rigid) คุณสมบัติทางกายภาพทั่วไปของยางพาราชนิดนี้คือ จะมีความเหนียวของน้ำ ยางมากกว่ายางพาราโดยทั่วไป ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงและปลอดภัยดีตามมา ด้วย

2.1.4.2 ยางพารา C58S เป็นยางที่ได้จากการต้มยางพาราดิบ 58% และมีการใส่แอมโมเนียช่วยในการคงสภาพความเป็นของเหลว นอกจากนั้นจะมีขั้นตอนในการใส่สารเคมีเช่นเดียวกับยางพารา C45S แต่มีข้อแตกต่างในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพคือ ทางด้านของความเข้มข้นของน้ำยาง โดย C58S จะมีความเข้มข้นของน้ำยางมากกว่า C45S และมีความหนืดของน้ำยางมากกว่า

2.1.4.3 ยางพารา C58S (โซเดียมซิลิเกต) เป็นยางที่ได้จากการต้มยางพาราดิบ 58% และมีการใส่แอมโมเนียช่วยในการคงสภาพความเป็นของเหลว นอกจากนั้น จะมีขั้นตอนในการใส่สารเคมีที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับสารประเภทเรซิน ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต เข้าไปอีกด้วย ซึ่งจากการเพิ่มเติมสารเคมีลงไป จึงก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพนั้นคือ น้ำยางมีความหนืดสูงมากขึ้นและจะมีเนื้อยางที่แน่นกว่าเดิมแต่จะละลายในน้ำได้ดีกว่าสูตรอื่น ก้อนอิฐมวลเบาพารากริต [4] เป็นหนึ่งในผลงานการใช้ยางพาราสังเคราะห์ ผสมกับวัสดุทางธรรมชาติ ได้แก่ ขี้เลื่อยร่อนละเอียด ดินลูกรัง หินฝุ่น ทราย น้ำยางแปรรูปพิเศษ นำมาผสมเพื่อขึ้นรูปเป็นอิฐที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป

2.1.5 ทดสอบความซึมน้ำของดิน (Soil Permeability Test) [5] มาตรฐานอ้างอิง : ASTM D 2434 – 68

มวลดินเป็นวัสดุที่มีช่องว่างต่อเนื่องในระหว่างเม็ดดิน ดังนั้นเมื่อน้ำที่มีความดันต่างกันระหว่าง 2 จุดในมวลดิน ก็จะมีการไหลของน้ำผ่านช่องว่างเหล่านั้น ความสามารถที่มวลดินให้น้ำซึมผ่านไปได้นี้ เรียกว่า “ความซึมน้ำของดิน” (Permeability), k ถ้ามวลดินที่น้ำซึมผ่านได้ง่าย ค่า k ก็สูง เรามักเรียกว่า “Pervious Soil” ถ้าน้ำซึมผ่านได้ยาก ค่า k ต่ำ จะเรียกว่า “Impervious Soil”

ค่าความซึมน้ำของดิน เป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของดินหลายอย่าง เช่น การรั่วซึมของน้ำที่เก็บกักโดยการปิดกั้นโดยเขื่อนดิน, ความมั่นคงของลาดเขื่อน ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงดันน้ำภายในตัวเขื่อน, อัตราการทรุดตัวของชั้นดินเกิดจากน้ำหนักสิ่งก่อสร้าง, ความมั่นคงและปริมาณน้ำที่ไหลเข้าบ่อที่ขุดเพื่อก่อสร้างฐานราก, และแม้กระทั่งปริมาณน้ำที่สามารถสูบขึ้นมาใช้ได้จากการเจาะน้ำบาดาล

การหาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมน้ำได้ในสนาม (Field permeability test) ทำโดยการเจาะฝัगत่อลงไปดิน ถ้าชั้นดินที่ต้องการหาค่าความซึมได้อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน ให้ใช้วิธีสูบน้ำลงไปไหลในหลุมเจาะ ถ้าชั้นดินอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน จะใช้วิธีสูบน้ำเข้าในหรือออกจากหลุมเจาะก็ได้ แล้ววัดอัตราการไหลของน้ำที่จะรักษาระดับความดันคงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความซึม

$$v = ki \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ

v = ความเร็วของการไหลซึม (LT^{-1})

i = ไฮดรอลิกเกรเดียนต์ = $\Delta h / \Delta y$

k = ความซึมผ่านของตัวกลาง ซึ่งเป็นค่าคงที่ (LT^{-1})

Δh = ความต่างของระดับน้ำ (Head Difference) ในช่วงความยาวของการซึม ΔL

จากสมการที่ 1 จะนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ปัญหาทางการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดิน ได้เกือบทุกแบบ สิ่งสำคัญ คือ ค่าคงที่ที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของชั้นดินที่เรียกว่า ค่าความซึมผ่าน (Permeability) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของสิ่งต่อไปนี้

1. ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน (Grain Size and Shape) แท้ที่จริงแล้วค่าความซึมผ่านควรจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของช่องว่างระหว่างเม็ดดินมากกว่า แต่คุณสมบัติทั้งสองของมวลดินมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด เช่น ดินที่มีเม็ดเล็กบางและเป็นแผ่น ช่องว่างที่น้ำซึมผ่านก็มักจะมีลักษณะเช่นเดียวกัน Allen Hazen ได้เสนอว่าในทรายและกรวด ค่าความซึมผ่านสามารถสัมพันธ์กับขนาดเม็ดดังนี้

$$K = 100 D_{10}^2 \text{ ซม./วินาที} \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ D_{10} = ขนาดเม็ดเมื่อมี 10 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักเป็นเม็ดที่เล็กกว่าที่ระบุ (ซ.ม.)

2. ความหนืดของของเหลวที่ซึมผ่าน (Viscosity of Pore Fluid) ในทางวิศวกรรมโยธามักเกี่ยวข้องกับน้ำเท่านั้น แต่ความหนืดของน้ำก็อาจเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากอุณหภูมิ และมักจะยึดถือเอาความหนืดที่อุณหภูมิ 20 °c เป็นเกณฑ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดจะลดลง ทำให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย ดังนั้น ค่าความซึมผ่าน ณ อุณหภูมิต่าง ๆ อาจมีความสัมพันธ์กับที่ 20 °c ดังนี้

$$k_T = k_{20} \times (\eta_{20} \div \eta_T) \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ η_{20} , η_T เป็นความหนืดของน้ำที่อุณหภูมิ 20 °c และ T °c ตามลำดับ

3. อัตราส่วนของช่องว่าง (Void Ratio) คือ อัตราส่วนของช่องว่างระหว่างดินต่อปริมาตรเม็ดดิน เช่นในทรายหลวม น้ำย่อมไหลสะดวกกว่าทรายอัดแน่น มีผู้พยายามค้นคว้าหาความสัมพันธ์ของค่าความซึมน้ำกับอัตราส่วนของช่องว่าง เช่น

$$k = c \times [e^3/(1+e)] \quad \dots\dots\dots (4)$$

4. ความอิ่มตัวของมวลดิน (Degree of Saturation) เมื่อมวลดินไม่อิ่มตัว ย่อมจะมีช่องอากาศคอยกั้นช่องว่าง ทำให้น้ำไหลซึมไม่สะดวก ดังนั้นในการทดลองในห้องปฏิบัติการจึงมักใช้ตัวอย่างดินที่อิ่มตัว เพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลนี้ ในการทดลองหาค่าความซึมน้ำอาจทำได้หลายวิธี เช่น แบบความดันน้ำคงที่ (Constant head) หรือความดันน้ำเปลี่ยนไป (Variable head) หรือแม้แต่ทดสอบในสนาม

$$\text{เมื่อ : } Q = vA = kiA \quad \dots\dots\dots (5)$$

K = ค่าความซึมน้ำของตัวอย่างดิน ซึ่งต้องการทราบ

i = ไฮโดรลิก เกรเดียน = h/L

เมื่อแทนค่า i แล้วหาค่า k ในเทอมตัวแปรต่าง ๆ จะได้

$$k = QL/Ah \quad \dots\dots\dots (6)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำที่วัดระหว่างการทดสอบ, ซม.³/วินาที

L = ความยาวของตัวอย่างดิน, ซม.

A = พื้นที่หน้าตัดตัวอย่างดิน, ซม.²

h = ความต่างของระดับน้ำ (ดังรูปที่ 1), ซม.

ในกรณีที่ใช้ความดันเข้าช่วย $h = p/\gamma_w$ ดังนั้นสมการ 6 จะเป็น

$$k = (Q \times L \times \gamma_w)/AP \quad \dots\dots\dots (7)$$

การทดลองหาค่าความชื้นน้ำโดยวิธีความดันเปลี่ยน โดยใช้ความดันจากความสูงของระดับน้ำในหลอดแก้ว (Burette) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด a และระดับน้ำจะลดลงเรื่อยๆ ในระหว่างการทดลอง ถ้าเราพิจารณาในช่วงเวลาใดๆ dt โดยระดับน้ำในหลอดแก้วลดลง dt จากสมการ 1

เมื่อ

a, A = พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้วและ ตัวอย่างดิน ตามลำดับ, ซม.²

L = ความยาวของตัวอย่างดิน, ซม.

T = เวลาที่ทำการทดลองปล่อยให้ระดับ น้ำตกจาก ระดับ h_1 ถึงระดับ h_2 , วินาที

h_1, h_2 = ระดับน้ำเมื่อเริ่มจับเวลา และระดับน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 0 และ T วินาที ตามลำดับ, ซม.

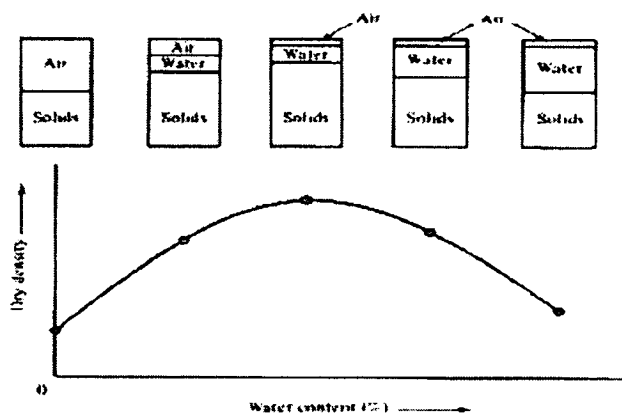
2.2 การทดลอง Standard Compaction

เมื่อดินรับแรงอัดทางกล Mechanical Compaction หรือแรงกระแทกเพื่อไล่อากาศออกไปจากช่องว่างระหว่างเม็ดดินจึงทำให้เม็ดดินเคลื่อนตัวเข้าหากันลดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน ปริมาตรมวลดินจึงลดลง ฉะนั้นดินจึงยุบและอัดตัว ความหนาแน่นของเม็ดดินจะสูงขึ้น มีกำลังต้านทานแรงเฉือนและรับน้ำหนักได้มากขึ้น การไหลซึมผ่านของน้ำและการทรุดตัวของดินน้อยลง การศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบการบดอัดของดินในห้องทดลองมีด้วยกัน 2 วิธีคือ

2.2.1 Standard Proctor Test

2.2.2 Modified Proctor Test

ซึ่งการที่จะใช้การทดลองโดยวิธีใดก็ตามก็ต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการทดลองซึ่งผลที่ได้จากการทดลองทั้งสองจะได้ค่าที่แตกต่างกันเนื่องจากการถ่ายพลังงานลงสู่ดินนั้นแตกต่างกันไปในแต่ละวิธี แต่อย่างไรก็ตามเราก็จะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการที่จะทำให้ดินนั้นมีค่าความหนาแน่นสูงสุดทั้งสองวิธี การบดอัดดินเป็นกระบวนการที่ใช้แรงหรือน้ำหนักจากเครื่องมือกล กระทำให้เม็ดดินเบียดตัวชิดกัน เพิ่มความแน่นและความสามารถในการรับน้ำหนัก ลดการทรุดตัว ลดการซึมผ่านของน้ำ เครื่องมือกลที่ใช้ในการบดอัด เช่น รถบดล้อเหล็ก รถบดล้อยาง รถบดตีนแกะ รถบดชนิดสันกระแทก เป็นต้น การเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดขึ้นอยู่กับประเภทของดินหรือวัสดุที่จะบดอัด การบดอัดดิน เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพดิน คือทำให้ดินแน่น (Dense) สูงสุด เพื่อเหมาะสมแก่ งานประเภทต่าง ๆ ในเชิงวิศวกรรม การทำให้ดินแน่น หรือทำให้ดินมีความหนาแน่นสูงสุดนอกจากจะใช้พลังงาน เช่น บดอัด (Compact) แล้ว ยังต้องคำนึงถึงปริมาณความชื้น (หรือปริมาณน้ำ) และช่องว่าง (Void) ในดิน เพราะ ปกติดินประกอบด้วย มวลดิน ช่องว่าง และน้ำดังแสดงในรูปที่ 2



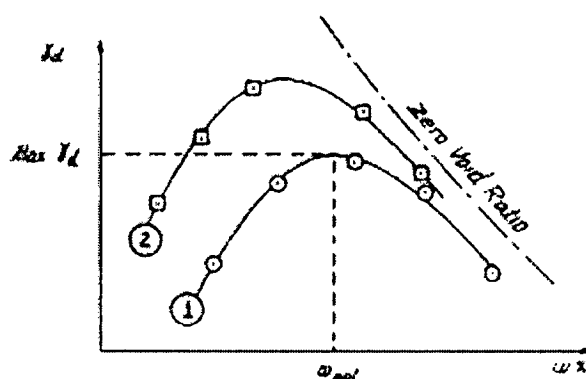
รูปที่ 1 สัดส่วนองค์ประกอบของดิน ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ และความแน่นของดิน ณ ภาวะต่าง ๆ (ที่มา: www.sdhabhon.com)

Hogentogler (1936) อธิบายว่า หากปริมาณความชื้นน้อย แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคดินสูง มีความฝืด หรือแรงเสียดทานมาก ดังนั้นจึงบดอัดยาก หากเพิ่มความชื้นอนุภาคดินจัดเรียงตัวดีขึ้น บดอัดง่ายขึ้น หากปริมาณน้ำเกินปริมาณที่เหมาะสม จะเกิดแรงผลักกันระหว่างน้ำกับอนุภาคดิน ทำให้อนุภาคดินไม่สามารถเรียงหรืออัดตัวกันได้ดีเท่าที่ควรและบวมตัว (Swell) หากปริมาณน้ำมากเกินไป จนเข้าไปแทนที่ช่องว่าง ระหว่างอนุภาคดินทำให้ดินใกล้อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation) การบดอัดดินจะทำให้ค่าความหนาแน่นแห้ง (Dry Density) ของดินสูงขึ้น ขณะที่ช่องว่าง หรือ โพรงอากาศระหว่างเม็ดดินลดลง ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมจะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของดินสูงสุด (Maximum Dry Density) เรียก "Optimum Moisture Content, OMC "

R.R. Proctor (1933) ได้กำหนดวิธีการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับ ความแน่น Density ของดินที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่ยอมรับและนิยมใช้ในการทดสอบการบดอัดในงานก่อสร้างโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีการทดสอบมาตรฐาน Standard Proctor Test โดยเฉพาะการทดสอบเพื่อควบคุมงานก่อสร้าง สนามบิน เขื่อนดิน พื้นโรงงาน เป็นต้น ในปัจจุบันยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งได้วิวัฒนาการมีขนาดใหญ่ขึ้น บรรทุกน้ำหนักได้มากหลายเท่าตัว พลังงานที่ใช้ในการบดอัดก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย จึงได้มีการกำหนดวิธีการทดสอบการบดอัดดินด้วยการเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้น เพื่อจะได้ฐานดินที่มีความแน่นสูงรับน้ำหนักได้มาก เรียกว่า วิธีการทดสอบแบบโมดิฟายด์ Modified Proctor Test

Test	Mold size	Wt. of Hammer (lbs.)	No. of Layer	Height of drop (in)	No. of blow per layer	Energy / vol. ft. lb/ft^3
Standard Proctor	$\varnothing 4.0'' \times 4.6''$	5.5	3	12	25	12,400
	$\varnothing 6.0'' \times 5.0''$	5.5	3	12	56	12,400
Modified Proctor	$\varnothing 6.0'' \times 5.0''$	10	5	18	56	56,000
	$\varnothing 4.0'' \times 4.6''$	10	5	18	25	56,500

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบอุปกรณ์และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบ Standard Proctor และ Modified Proctor (ที่มา : www.gerd.eng.ku.ac.th)



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dry Density (γ_d) และเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percent water content) ของ Standard Proctor (1) และ Modified Proctor (2)

ในการทำการบดอัดในห้องทดลอง ซึ่งปกติจะใช้เป็นมาตรฐานในการควบคุมการบดอัดในสนาม ต่อไป จะทำได้โดยการนำเอาวัสดุที่จะใช้ในการบดอัดในสนาม เข้ามาผึ่งให้แห้งแล้วค่อยๆเติมน้ำไปในปริมาณที่พอเหมาะ แล้วเริ่มทำการบดอัดใน Mold (แบบที่ใช้อัด) โดยวิธีการและรายละเอียดจะพูดถึงทีหลัง เมื่อชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดค่าความหนาแน่น ในครั้งต่อไปจะเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อย ๆ อย่างน้อย 4 – 6 ครั้ง เมื่อทราบความชื้นของการบดอัดในแต่ละครั้ง ก็จะหาค่าความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของดินแห้งกับความชื้น จะปรากฏเป็นเส้นกราฟโค้งขึ้นมีจุดยอด ซึ่งเรียกว่า “ความหนาแน่นสูงสุด” (Maximum Dry Density) ความชื้นที่จุดนั้นเรียกว่า “ความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด” (Optimum Water Content) ดังแสดงในรูปที่หนึ่ง ถ้าเอาพลังงานในการบดอัดสูงขึ้นในดินชนิดเดียวกัน เส้นกราฟการบดอัดจะขยับสูงขึ้น ดังเช่นใน รูปที่ 2 (2) จะสามารถสังเกตลักษณะพิเศษ 2 ประการ คือ ค่า γ_d ของ Modified Proctor จะสูงกว่า ของ Standard Proctor และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่จุด สูงสุด ซึ่งเรียกว่าความชื้นเหมาะสม (Optimum Moisture Content) ก็จะลดลงด้วย ขณะที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะพิเศษนี้เป็นคุณสมบัติของดินโดยทั่วไปเมื่อได้รับการบดอัด

2.3 การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR)

ในงานทาง วัสดุที่ใช้ก่อสร้างคันดิน หรือทำ โครงสร้างทาง นอกจากจะต้องปรับปรุงคุณภาพ ด้วย การบดอัดให้แน่น เช่น บดอัด ณ ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม แล้ว ยังต้องคำนึงถึงกำลังต้านทาน แรง หรือน้ำหนักกด และเสถียรภาพของดิน กล่าวคือ หากดินยุบตัวมาก แต่กำลังต้านทานน้อย อนุมานได้ว่า บดอัดไม่แน่น หรือกลับกัน นอกจากนั้น จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของดิน เมื่อปริมาณความชื้นสูงมาก คืออิ่มตัว (Saturated) ซึ่งในทางธรรมชาติ อาจเกิดขึ้นได้ เช่นโครงสร้างทาง หรือผิวทางในภาวะที่ถูกน้ำท่วมขัง

การทดสอบ California Bearing Ratio (CBR) คล้ายคลึงกับการทดสอบความแน่นของการบดอัด ดินในห้องปฏิบัติการ (ทั้งวิธี Standard หรือ Modified Proctor) ทั้งนี้เพราะกระบวนการเตรียมตัวอย่าง อุปกรณ์ทดสอบ และวิธีทดสอบ คล้ายคลึงกัน และกระบวนการทดสอบ CBR ก็จะต้องทดสอบหาความหนาแน่นของดินด้วยเสมอ เพียงแต่มีรายละเอียดการทดสอบเพิ่มเติม เช่น ทดสอบการบวมตัว (Swell) ของตัวอย่าง ภายใต้สภาวะที่ถูกแช่ในน้ำ (Soaking) ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะของดินที่บดอัดในสนาม เช่น โครงสร้างชั้นทางต่าง ๆ ซึ่งอาจถูกน้ำไหลบ่า หรือท่วมขัง เป็นเวลานานพอที่ทำให้ดินบวมตัว เสียรูป (Deform) หรือเสียเสถียรภาพในที่สุด ดังนั้น ในทางปฏิบัติ อาจแก้ไขด้วยการพยายามออกแบบให้ผิวทาง หรือโครงสร้างทางชั้นสำคัญ มีระยะปลอดภัย (Freeboard) อย่างเพียงพอ หรือออกแบบระบบระบายน้ำใต้ผิวดิน (Sub drain) เช่น มีชั้นทรายรองพื้น (Sand cushion) ใต้ผิวทางคอนกรีต ระบบระบายน้ำใต้ดินชนิดมีท่อกรู (Perforated pipe) ตัวกรองหรือวัสดุคัดเลือกรวมลก่อนข้างหยาบ ที่มีช่องว่างระหว่างมวล (Void) ก่อนข้างสูง นอกจากนั้น การทดสอบยังมีวัตถุประสงค์จะคำนวณค่า CBR ซึ่งเป็นค่าเปรียบเทียบ (ร้อยละ) ระหว่าง กำลังรับแรงต้านทาน (อาจเรียกว่า แรงธาร หรือ แรงแบกทาน - Bearing capacity) ของดิน ภายใต้น้ำหนักกด เปรียบเทียบกับกำลังมาตรฐาน ณ ค่าระยะยุบตัว (Penetration) ที่เท่ากัน

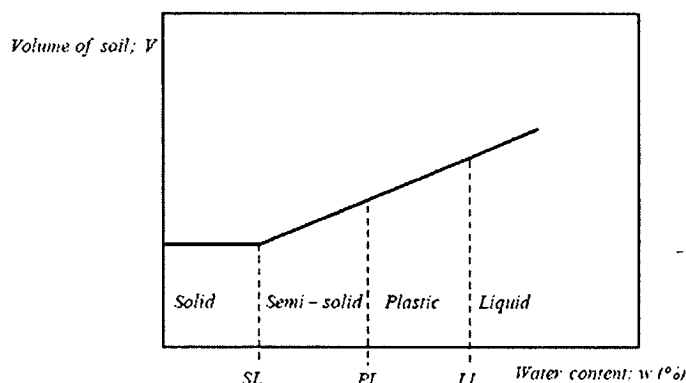
2.4 สถานภาพของดิน

สถานภาพของดินแบ่งได้ดังนี้

2.4.1 ชีดจำกัดเหลว (Liquid Limit, L.L.) หมายถึง ปริมาณน้ำในดินที่จุดเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากของเหลวเป็นพลาสติก หรือคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถไหลไปได้ด้วยน้ำหนักของดินเอง

2.4.2 ชีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit, P.L.) หมายถึง ปริมาณน้ำในดินที่จุดซึ่งดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากพลาสติกเป็นวัสดุแข็งของแข็ง หรือคือปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ดินสามารถถูกคลึงเป็นเส้นกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มม. ได้โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว

2.4.3 ชีดจำกัดการหดตัว (Shrinkage Limit, S.L.) หมายถึง ปริมาณน้ำในดินที่จุดซึ่งดินเริ่มเปลี่ยนสถานภาพจากวัสดุแข็งของแข็งเป็นของแข็ง หรือก็คือปริมาณน้ำที่มากที่สุดซึ่งถึงแม้ว่าจะมีการสูญเสียน้ำอีกต่อไปก็ไม่ทำให้ดินหดตัวหรือลดปริมาตรลง



รูปที่ 3 แสดงสถานภาพของมวลดิน

2.5 ประเภทของดิน

2.5.1 ดินเชื่อมแน่น (Cohesive Soil) คือ ดินที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เมื่อมวลดินเปียก และหลังจากนั้นทำให้แห้งลงเม็ดดินจะยังคงติดกันอยู่ ซึ่งต้องใช้แรงในการแยกเม็ดดินออกจากกัน ในสภาวะแห้ง ดินดังกล่าวจะสามารถตั้งตัวเป็นรูปทรงได้ทั้งในสภาวะที่ความชื้นตามธรรมชาติและในสภาวะแห้ง โดยเฉพาะในสภาวะแห้งจะแข็ง บีบให้แตกได้ยาก เรียกว่า ดินมีกำลังแห้งสูง (High Dry Shear Strength)

2.5.2 ดินไม่เชื่อมแน่น (Cohesionless, Non Cohesive Soil) คือ ดินที่ไม่มีความเป็นพลาสติก (Non Plastic) ในทุกสภาวะของความชื้น สังเกตได้จากการที่มีคุณสมบัติร่วน (Friable) ไม่จับตัวกัน ยกเว้นในสภาวะที่ชื้น (Moist) จะจับตัวกันหลวมๆ เมื่อขุดลงไปหลุมผนังดินจะสามารถตั้งได้ แต่เมื่อแห้งลงผนังดินก็จะพังลง

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1987, Ohama ได้อธิบายการก่อตัวของคอนกรีตผสมน้ำยาง [6] ไว้ว่าน้ำยางที่ใช้ผสมจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Emulsion) โดยอนุภาคของโพลิเมอร์ (Polymer) จะแขวนลอยอยู่ในน้ำยางเหลว ซึ่งเมื่อผสมน้ำยางเข้ากับคอนกรีตแล้ว จะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ 1. ปฏิกิริยา ไฮเดรชัน (Hydration) จากซีเมนต์ผสมกับน้ำ และ 2. ปฏิกิริยาการก่อตัวเป็นฟิล์ม (Film) ที่เกิดจากอนุภาคของโพลิเมอร์มารวมตัวกัน (Coalesce) ซึ่งการก่อตัวของชั้นฟิล์มเสมือนเป็นเนื้อเดียวกันกับคอนกรีต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานหรือตัวยึด (Binder) ระหว่างมวลรวมเข้าด้วยกันเป็นคอนกรีต

จากรายงานผลการทดลองทั่วโลกเป็นที่ยอมรับว่าการผสมยางลงในแอสฟัลต์ทำให้คุณภาพของถนนดีขึ้นในทุกด้าน [3] สถาบันวิจัยยางมาเลเซียรายงานว่าการถนนทนทานขึ้นประมาณสามเท่า ค่าซ่อมบำรุงถูกลง 2.7 เท่า สถาบันวิจัยถนนของอินเดีย ภายใต้การสนับสนุนของธนาคารโลกรายงานผลการศึกษาว່ารถยนต์ที่วิ่งบนถนนลาดยางผสมแอสฟัลต์ใช้น้ำมันน้อยลง 5-7% ถนนสภาพดีทำให้ผู้ขับขี่ปลอดภัยและสบายกว่ายางเคมีที่นิยมใช้กัน ในประเทศพัฒนาจะมีราคาแพงแต่อาจจะถูกลงบ้างเมื่อมีการผลิตจำนวนมาก และดูจะเหมาะสมกับประเทศเหล่านั้น ในสหรัฐอเมริกาประเทศเดียวจะมียางรถยนต์ถูกถึง 250 ล้านเส้น เป็นปัญหากับสิ่งแวดล้อมเป็นอันมาก น้ำยางผสมแอสฟัลต์ น่าจะเหมาะกับประเทศกำลังพัฒนาโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติที่ประสบปัญหาราคายางตกต่ำอยู่เสมอ จากการศึกษาของสถาบันวิจัยถนนอินเดียพบว่าถ้าใช้น้ำยางผสมแอสฟัลต์ลาดผิวถนนสองเลนจะใช้ยางธรรมชาติหนึ่งตันต่อระยะหนึ่งกิโลเมตร ดังนั้นถ้าใช้ยางผสมแอสฟัลต์เพียง 10,000 กิโลเมตรก็จะใช้ยางถึง 10,000 ตัน นับว่าเป็นการเพิ่มการใช้ยางภายในประเทศเป็นอย่างดี จะเห็นได้ชัดเจนว่าการใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการผสมยางกับแอสฟัลต์เพียงไม่เกิน 20% ในการลาดผิวถนนคุ้มกับความทนทานที่เพิ่มขึ้น 1-3 เท่า และค่าซ่อมที่ลดลงประมาณ 30% เมื่อรวมกับผลทางเศรษฐกิจอื่นๆ เช่น การจราจรที่คล่องตัว การประหยัดน้ำมัน ลดอุบัติเหตุ เป็นต้น ยางธรรมชาติที่ผสมเข้าไปเท่าไรก็ลดการนำเข้าแอสฟัลต์เท่านั้นอีกด้วย จึงน่าจะคุ้มค่าทางเศรษฐกิจที่จะใช้ยางผสมแอสฟัลต์

การศึกษาใช้น้ำยางพาราในคอนกรีตมวลเบาแบบฟองอากาศ-อบไอน้ำ [7] โดยทำการทดลองออกแบบส่วนผสม โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายบดละเอียดเท่ากับ 1: 1 โดยน้ำหนัก ปริมาณผงอลูมิเนียมเท่ากับร้อยละ 0.3 ของส่วนผสมทั้งหมด อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก (ไม่รวมน้ำหนักของน้ำในน้ำยางพารา) ปริมาณปูนขาวเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณยิปซัมเท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ในการเตรียมน้ำยางพาราใช้สารแอมโมเนียเหลวเข้มข้นร้อยละ 15 ในสัดส่วนร้อยละ 3 ของน้ำหนักน้ำยางพารา คอนกรีตต้องผสมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุในปริมาณร้อยละ 4 ของน้ำหนัก

ปูนซีเมนต์ ใช้อัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตามลำดับ ทำการผสมและอบไอน้ำตามมาตรฐาน มอก. นำมาทดสอบค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร ค่ากำลังอัดและค่ากำลังดัด ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ค่าการดูดกลืนน้ำที่อายุ 7 และ 28 วัน ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM ผลการวิจัยพบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาจะแปรผกผันกับปริมาณอัตราส่วนของน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ ในขณะที่ค่ากำลังดัดของคอนกรีตจะแปรผันตรงกับปริมาณอัตราส่วนของน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ โดยที่เมื่อผสมน้ำยางพารามากขึ้นค่ากำลังอัดจะลดลงแต่ค่ากำลังดัดจะเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นจะแปรผกผันกับปริมาณของอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ ค่าการดูดกลืนน้ำจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ ค่าการเปลี่ยนแปลงความยาว (ร้อยละการหดตัว) มีค่าไม่แน่นอนในแต่ละอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมากกว่าคอนกรีตมวลเบาแบบปกติอยู่เล็กน้อย โดยปริมาณน้ำยางที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้คือ การใช้ปริมาณอัตราส่วนน้ำยางพาราต่อปูนซีเมนต์ 0.10 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วสามารถนำไปผลิตเป็นวัสดุคอนกรีตมวลเบาแบบปานกลางที่สามารถรับกำลังได้สูง และเป็นฉนวนป้องกันความร้อนได้ดี

Lindh [8] ได้ทำการทดสอบภาคสนามโดยการนำเอาเส้นใยพลาสติกชนิดสั้น (48 มม.) มาผสมกับทรายในการก่อสร้างถนน ในสัดส่วนร้อยละ 0.5 และ 0.25 ของน้ำหนักทรายแห้งพบว่า การเสริมเส้นใยสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของทรายภายหลังการบดอัดได้เป็นอย่างดี อีกทั้งผลการทดสอบ CBR พบว่าค่า CBR มีค่ามากกว่าดินที่ไม่ได้ผสมเส้นใย

Fookes และ Denness [9] ได้มีนิยามรอยแตกภายในดินเหนียวว่าเป็นส่วนการแตกหัก (Rupture) เล็กๆบนพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการแบ่งแยกและความไม่ต่อเนื่องในวัสดุ

เอกรัตน์ รอดบำรุง [10] รายงานว่าเมื่อนำเส้นใยโพลีเอสเตอร์ผสมในดิน เส้นใยมีส่วนช่วยลดรอยแตกร้าวในดินได้ โดยทำการทดลองกับดินเหนียวสุพรรณบุรีผสมเส้นใยที่อัตราส่วน 0%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% และ 0.5% โดยน้ำหนักดินแห้งตามลำดับ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการให้ความชื้นและอบแห้งเป็นรอบๆ ทั้งหมด 4 รอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้เกิดรอยแตกในดินเหนียวมีปริมาณที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณรอยแตกวัดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเทียบพื้นที่รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ตัวอย่างดินที่ทำการถ่ายภาพ

ภู่รี [11] ศึกษาการผสมเส้นใยผ้าใบในดิน ดินแกรนิตและดินลูกรังพบว่าปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้นช่วยลดการแตกร้าวในมวลดินในรอบการอบแห้งที่สูงขึ้น โดยปริมาณส่วนผสมของเส้นใยที่เหมาะสมในการควบคุมการแตกร้าวอยู่ที่ ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับน้ำหนักดินแห้ง