บทที่ 5

ผลการทดลองและวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาการพัฒนากำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว โดยการศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงทางด้านส่วนประกอบของส่วนผสม ซึ่งได้จากการทำ X-ray diffraction ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด เมื่อผสมด้วยปูนขาวที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ โดยจะได้กล่าวแยกตามคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่ได้กำหนดไว้สำหรับงานวิจัยนี้คือ

- คุณสมบัติทางด้าน Plasticity
- คุณสมบัติทางด้านการบดอัด
- คุณสมบัติทางด้านกำลัง

การวิเคราะห์ผลความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดนี้จะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางด้านแร่และเคมีตามที่ได้ศึกษาไว้แล้วในบทที่ 4 มาประกอบการพิจารณา

5.1 คุณสมบัติทางด้าน Plasticity

คุณสมบัติทางด้าน Plasticity ของตัวอย่างดินตามธรรมชาติที่ใช้ศึกษามีค่า Liquid Limit ระหว่าง 45.7 ถึง 69.7 % และค่า Plasticity Index ระหว่าง 7.09 ถึง 35.03 % จากผลการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ยังไม่สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้าน Plasticityของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวได้อย่างแน่นอน ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่า Liquid Limit และ Plastic Limit จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและส่วนประกอบของดินตามธรรมชาติเป็นสำคัญ

5.1.1 ดินหนองงูเห่า

รูปที่ 5.1 ก. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit ที่ระยะเวลาการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

เมื่อทำการทดลองทันทีหลังจากผสมดินเหนียวกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 2 %) จะทำให้ค่า Liquid Limit เพิ่มสูงขึ้นมาก แต่เมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมมากกว่า 2 % ค่า Liquid Limit กลับลดลงตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสาเหตุ 2 ประการคือ

1. ที่รอยเกาะกันในโครงสร้างแบบระเกะระกะของแร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์ (ประมาณ 35 % ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม.) เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นอย่างรวดเร็ว (Diamond และ Kinter, 1965) ซึ่งจะมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานทำให้ส่วนผสมมีกำลังเฉือนสูงขึ้น ค่า Liquid Limit จึงเพิ่มขึ้น

2. แร่ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Liquid Limit ในดิน สำหรับดินหนองงูเห่าจะประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดนี้ประมาณ 35 % ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. โดยมี Na^+ เป็น exchangeable cation ที่สำคัญ (15.5 meg/100 gm) ดังนั้นเมื่อ exchangeable cation Na^+ ถูกแทนที่โดย Ca^+ จากปูนขาว จะทำให้วงน้ำ double layer หดแคบเข้า จึงมีผลทำให้ค่า Liquid Limit ลดลง

เมื่อรวมผลจาก 2 ประการนี้แล้วการที่ค่า Liquid Limit มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสมด้วยปูนขาวนั้นเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของกำลังเฉือนซึ่งมีผลมากกว่าวงน้ำ double layer หดตัว จึงทำให้ค่า Liquid Limit เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไป Ca^{2+} จะเข้าไปแทนที่ exchangeable cation ต่าง ๆ ได้มากขึ้น จนทำให้การหดตัวของวงน้ำ double layer มีผลเหนือกว่าการเพิ่มขึ้นของค่า Liquid Limit เนื่องจากกำลังเฉือน จึงทำให้ค่า Liquid Limit ลดลงตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Clare และ Cruchley (1957)

เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ในส่วนผสมปูนขาว 2 % ค่า Liquid Limit ยังคงเพิ่มขึ้นแต่อัตราการเพิ่มน้อยกว่าเมื่อทดลองทันที เมื่อปริมาณปูนขาวมากกว่า 2 % ค่า Liquid Limit กลับลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มเข้าไป กล่าวคือ ลักษณะของกราฟจะคล้ายกับตัวอย่างดินที่ทดลองทันที แต่เมื่อปริมาณปูนขาวมากกว่า 6 % ค่าLiquid Limit กลับเพิ่มขึ้นอีกโดยเฉพาะถ้าระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่า Liquid Limit ในช่วงที่กล่าวมานี้ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ระหว่างปูนขาวที่เพิ่มขึ้นกับสารประกอบซิลิก้าและอลูมิน่าของ

แร่ดินเหนียวมอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์ซึ่งเป็น three-layer mineral ทำให้เกิดสารประกอบใหม่ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน ดังนั้น กำลังเฉือนจึงเพิ่มขึ้นจนเป็นเหตุให้ค่า Liquid Limit กลับเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม

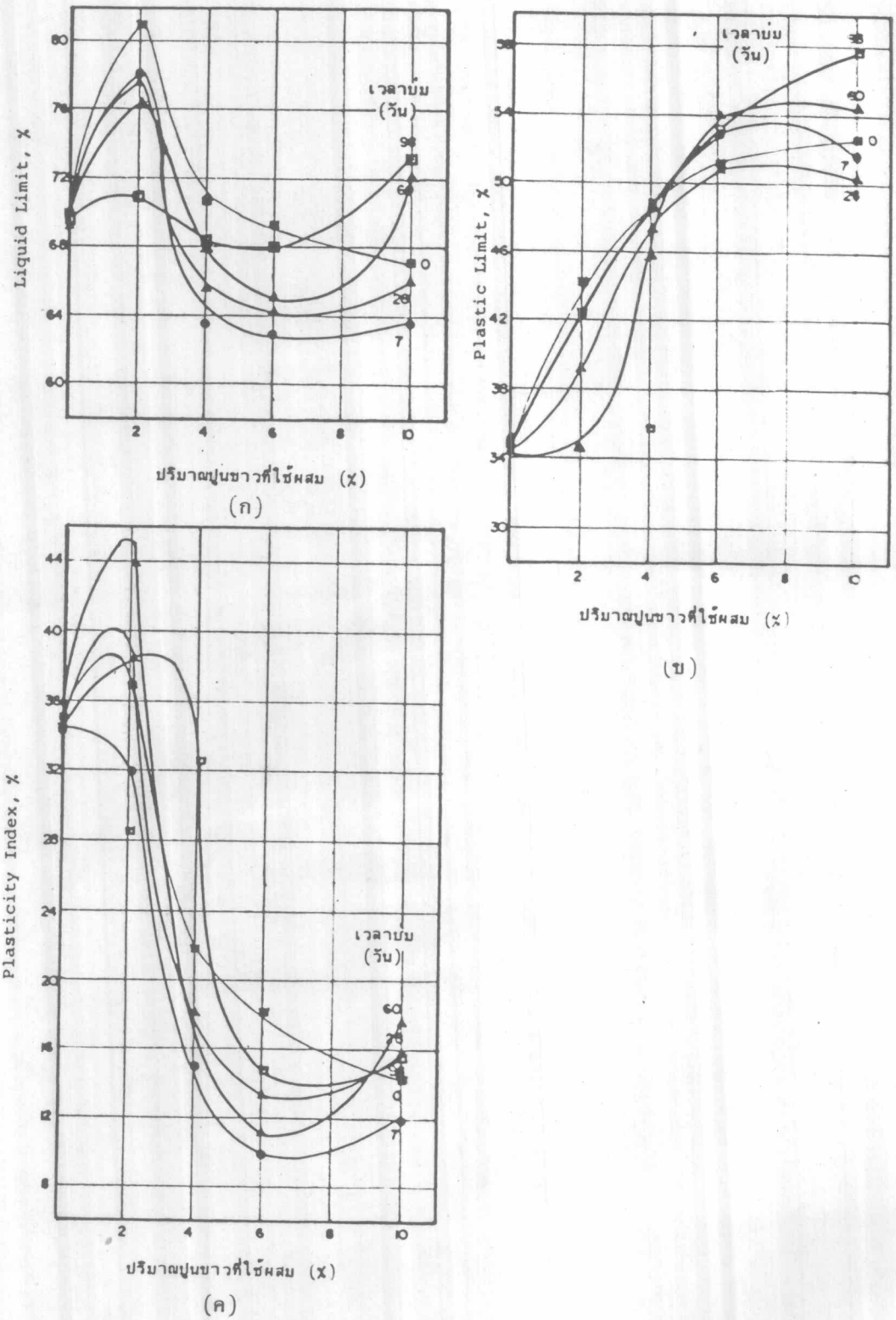
รูปที่ 5.1 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมพบว่าค่า Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มเข้าไป ผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Lund และ Ramsey (1959) Herrin และ Mitchell (1961) Jan และ Walker (1963) Wang, Mateos และ Davidson (1963) เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่า Plastic Limit ก็ยังคงเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม

รูปที่ 5.1 ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Plasticity Index ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมพบว่า ค่า Plasticity Index ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม แต่เมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเกินกว่า 2 % ค่า Plasticity จะลดลงอย่างรวดเร็ว พอปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเกิน 6 % ค่า Plasticity Index กลับเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นตัวอย่างดินที่ทดลองทันทีเท่านั้นที่ค่า Plasticity Index จะลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มเข้าไป

5.1.2 ดินพานทอง

รูปที่ 5.2 ก. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวพบว่าเมื่อทดลองทันทีที่ผสมค่า Liquid Limit จะเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณปูนขาวเกินกว่า 2 % แล้วค่า Liquid Limit กลับลดลงตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป การที่ค่า Liquid Limit เพิ่มขึ้นแล้วลดลงดังที่กล่าวมานั้นสามารถอธิบายดังเหตุผลเช่นเดียวกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า ทั้งนี้เนื่องจากว่าดินพานทองมีส่วนประกอบทางด้านแร่คล้ายคลึงกันกับดินหนองงูเห่า นอกจากนี้ดินพานทองมี Na^{+} เป็น exchangealbe cation ที่สำคัญคือ มีถึง 9.4 meg/100 gm. จึงสามารถถูกแทนที่ได้โดย Ca^{2+} จากปูนขาว ดังนั้นคุณสมบัติด้าน plasticity ของดินพานทองจึงมีแนวโน้มคล้าย ๆ กับในดินหนองงูเห่า

เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่า Liquid Limit จะลดลงตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป ทั้งนี้เนื่องจากดินพานทองประกอบด้วยแร่ดินเหนียวพวกthree layer mineral



รูปที่ 5.1 ผลการทดลองทางด้าน Plasticity ของดินหนองงูเห่า เมื่อผสมด้วยปูนขาว ที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ

คือมอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์เป็นส่วนใหญ่ (30 และ 40 % ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม.) ดังนั้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นปูนขาวก็จะมีโอกาสถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคดินเหนียวมากขึ้นโดยไม่มีการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ดังรายละเอียดที่กล่าวในบทที่ 2 ดังนั้นวงน้ำ double layer จะมีขนาดเล็กลงและกำลังเฉือนของดินก็ไม่ได้เพิ่มขึ้นมากทำให้ค่า Liquid Limit ลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น

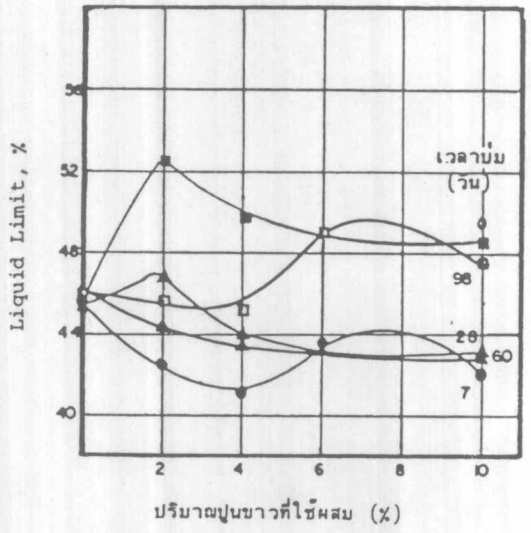
ระยะเวลาในการบ่มระหว่าง 60-90 วันพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวมากกว่า 6 % นั้นค่า Liquid Limitกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในช่วงระยะเวลานี้โครงสร้างของแร่ดินเหนียวพวกมอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์เริ่มพังทะลายลงและได้ทำปฏิกิริยา pozzolanic ทำให้เกิดตัวประสานที่ทำให้กำลังเฉือนเพิ่มขึ้น ประกอบกับเมื่อโครงสร้างแร่ดินเหนียวพังทลายลงวงน้ำ double layer ก็ลดน้อยลงไปด้วยจึงเป็นสาเหตุอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่า Liquid Limit เพิ่มสูงขึ้น

รูปที่ 5.2 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม พบว่าที่ทุกระยะเวลาในการบ่มค่า Plastic Limit จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป ผลการทดลองนี้ได้ผลเหมือนกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า

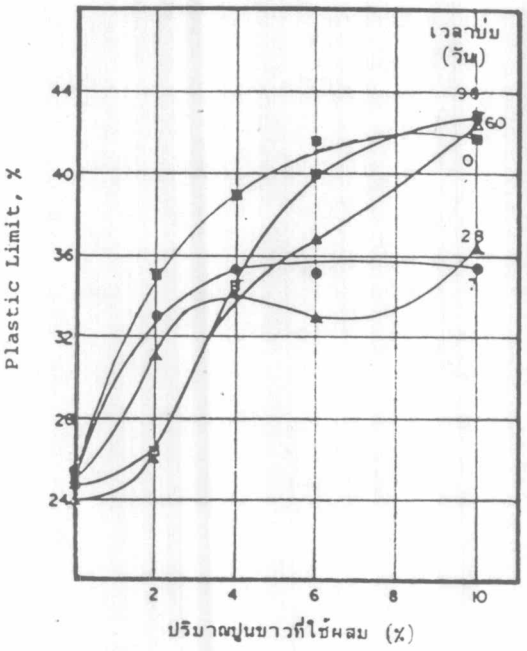
รูปที่ 5.2 ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า P I. ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม พบว่าค่า Plasticity Index จะลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มเข้าไป

5.1.3 ดินระนอง

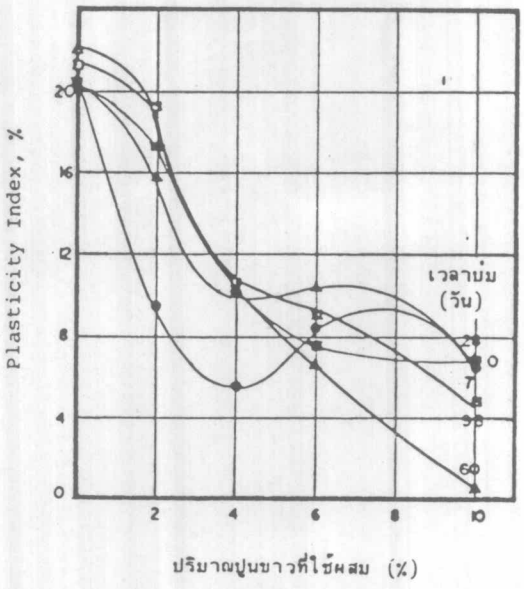
รูปที่ 5.3 ก. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมพบว่าค่า Liquid Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ จะสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไป ทั้งนี้เนื่องจากดินระนองมีแร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์เป็นส่วนใหญ่และมีอิลไลท์อยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปจะทำให้เพิ่มปริมาณ Ca^{2+} ที่จะทำปฏิกิริยา pozzolanic กับซิลิก้าและ/หรืออลูมิน่าที่สลายตัวออกมาจากแร่คาโอลิไนท์ ทำให้เกิดตัวประสานยังผลให้กำลังเฉือนเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่า Liquid Limit จึงเพิ่มตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 29 วันพบว่าที่ปริมาณปูนขาวเกินกว่า 6 % จะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Liquid Limit กับปริมาณปูนขาวเปลี่ยนแปลง คือมีจุดเปลี่ยนโค้งที่แสดงให้เห็นว่าค่า



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.2 ผลการทดลองทางด้าน Plasticity ของดินพานทอง เมื่อผสมด้วยปูนขาว ที่ปริมาณและระยะ เวลาในการบ่มต่าง ๆ

Liquid Limit กลับเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากซิลิก้าและ/หรืออลูมินาจากอิลไลท์ซึ่งอิ่มตัวด้วย Ca^{2+} ได้พังทะลายลงและทำปฏิกิริยา pozzolanic กับปูนขาวอันก่อให้เกิดสารประกอบซึ่งเป็นตัวประสานทำให้กำลังเฉือนเพิ่มขึ้น ค่า Liquid Limit จึงเพิ่มมากขึ้น

รูปที่ 5.3 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plastic Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาว พบว่าค่า Plastic Limit ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ ของดินระนองเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มเข้าไป ซึ่งผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับดินหนองงูเห่าและดินพานทอง

รูปที่ 5.3 ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Plasticity Index ที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ กับปริมาณปูนขาว พบว่าค่า Plasticity Index ลดลงตามอัตราส่วนผสมปูนขาวที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่า Plasticity Index ก็ยังคงลดลงตามอัตราส่วนผสมปูนขาวที่เพิ่มขึ้น

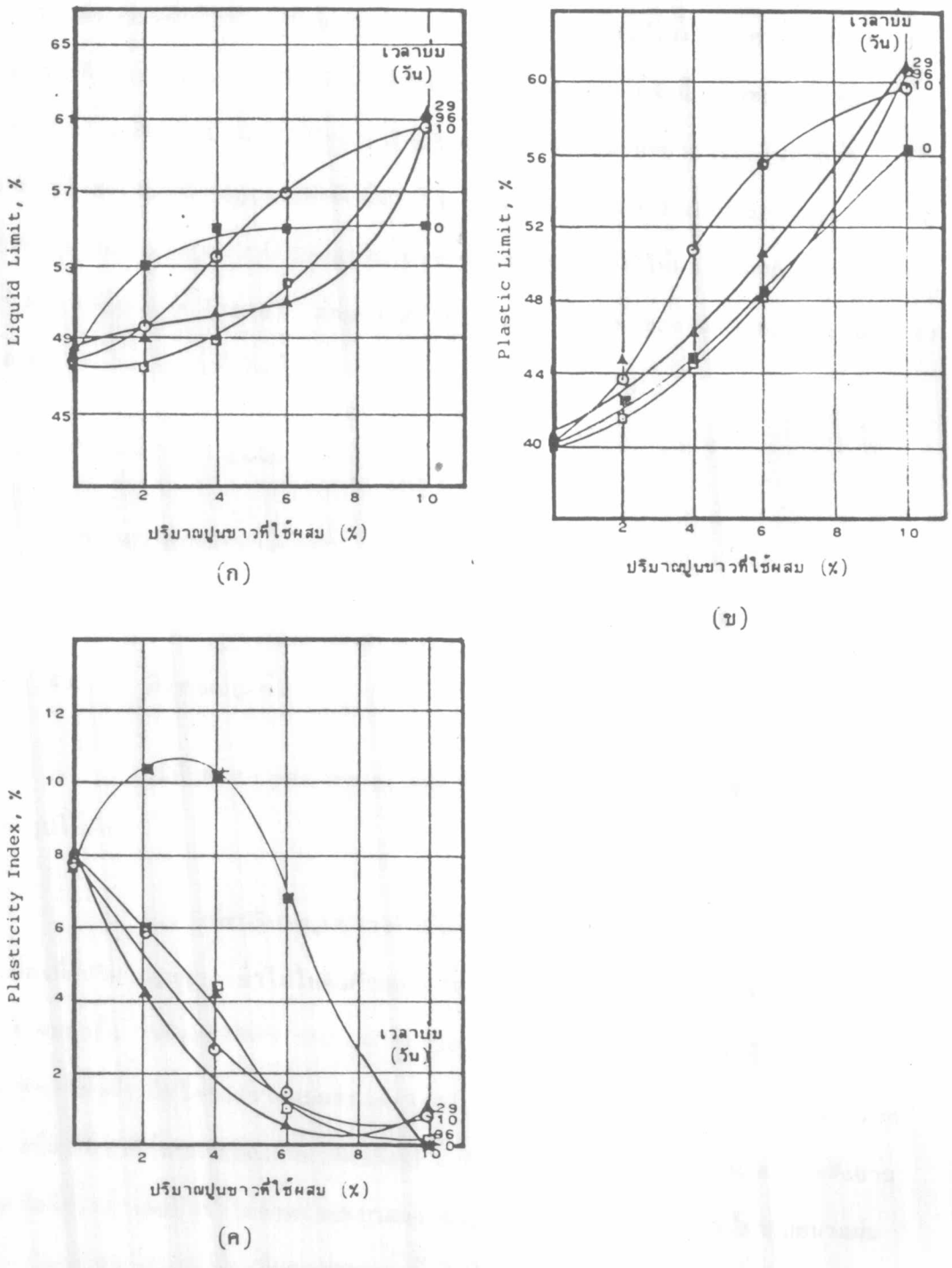
5.1.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้าน Plasticity ของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด

จากผลการทดลองทางด้าน plasticity ของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดพบว่าค่า Liquid Limit นั้นมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปขึ้นกับคุณสมบัติของดินตามธรรมชาติ จากการทดลองดินตัวอย่าง 3 ชนิดพอจะสรุปได้ว่า ในดินที่มีคาโอลิไนท์เป็นส่วนประกอบหลักเช่นในดินระนอง ค่า Liquid Limit จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาว แต่ในดินที่มีแร่ดินเหนียวพวก three layer mineral เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่เช่นในดินหนองงูเห่าและดินพานทอง ค่า Liquid Limit จะเพิ่มในตอนแรกเมื่อปูนขาวที่ผสมปริมาณน้อย (น้อยกว่า 2 %) และค่า Liquid Limit จะลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มเข้าไป

ส่วนค่า Plastic Limit ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองของ Herrin และ Mitchell (1961) และนักวิจัยคนอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

ค่า Plasticity Index นั้นเป็นเพียงพารามิเตอร์ตัวหนึ่งซึ่งไม่ได้สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงในส่วนผสม กล่าวคือจะขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของค่า Liquid

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ผลการทดลองทางด้าน Plasticity ของดินระนอง เมื่อผสมด้วยปูนขาวที่ปริมาณและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ

Limit และ Plastic Limit ตัวอย่างเช่นการที่ Liquid Limit และ Plastic Limit เพิ่มขึ้นเท่า ๆ กันก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า Plasticity Index จะเห็นว่าทั้ง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในส่วนผสมแต่ค่า PI. ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย ค่า Plasticity Index ของดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดเมื่อผสมปูนขาว สามารถสรุปได้ดังนี้ ดินหนองงูเห่า Plasticity Index จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณปูนขาวที่ผสมมีปริมาณน้อย (น้อยกว่า 2 %) และจะมีค่าลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น โดยค่า Plasticity Index ของดินหนองงูเห่าจะมีค่าต่ำสุดเมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเป็น 6 % ซึ่งผลการทดลองนี้ให้ผลเหมือนกับการทดลองของนายนิติ อรัญยะนาค (1978) ส่วนค่า Plasticity Index ของดินพานทองและดินระนองจะลดลงตามปริมาณปูนขาวที่เพิ่มขึ้น

5.2 คุณสมบัติทางด้านการบดอัด

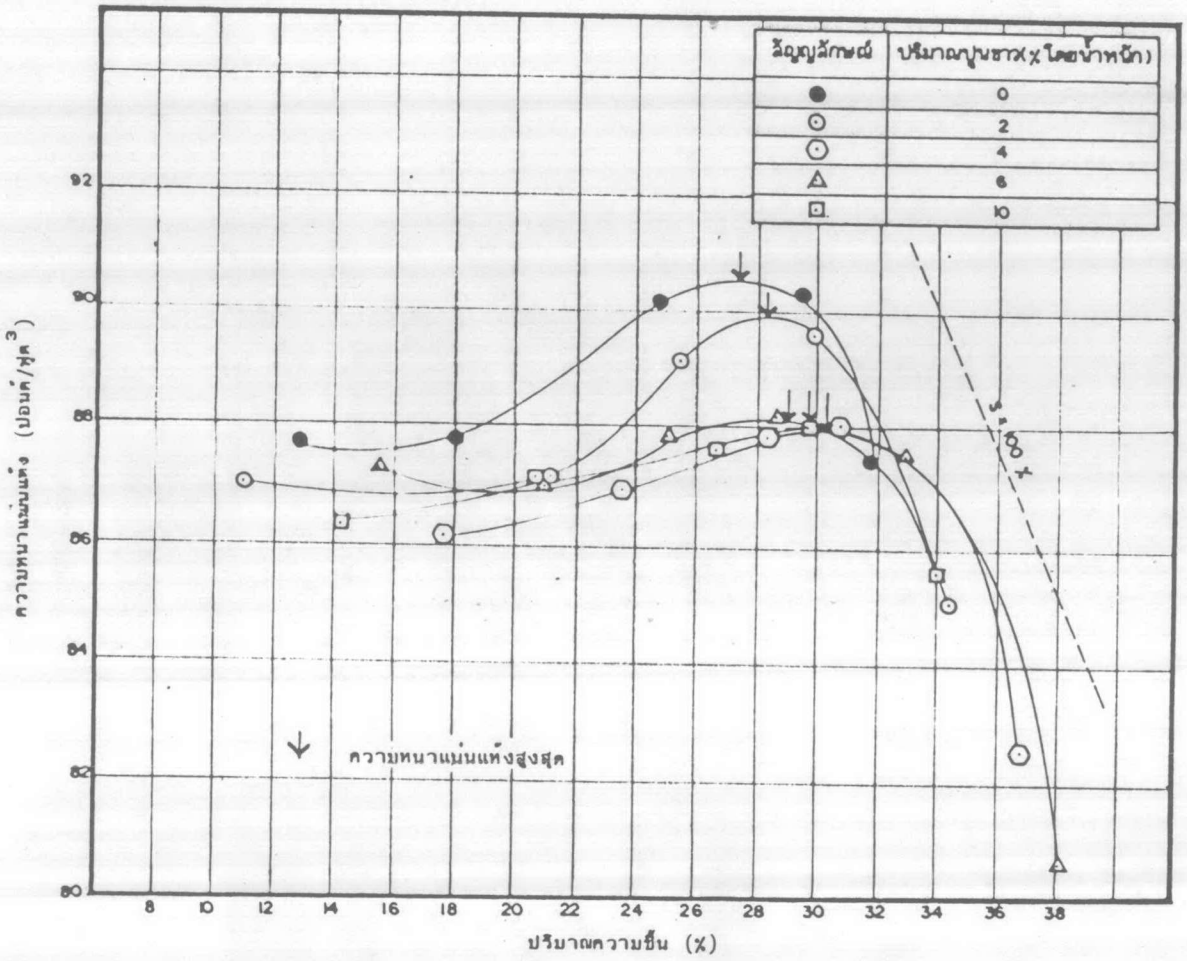
การศึกษาคุณสมบัติทางด้านการบดอัดได้ทดลองกับดินตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด โดยทำการผสมปูนขาวด้วยปริมาณ 2, 4, 6 และ 10 % โดยน้ำหนัก ผลของการทดลองมีดังนี้

5.2.1 ดินหนองงูเห่า

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง ทั้งนี้เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปในดินตัวอย่างแล้ว electrolyte content ของน้ำในช่องว่างมวลดินจะสูงขึ้น เกิดปฏิกิริยา cation exchange ทำให้อนุภาคดินเหนียวมีแนวโน้มที่จะเกาะและจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานในการบดอัดเพิ่มมากขึ้นเพื่อทำให้อนุภาคดินเหนียวจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและแน่น แต่เนื่องจากพลังงานในการบดอัดมีค่าเท่าเดิมจึงทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดลดลงไป นอกจากนี้ความหนาแน่นของปูนขาวมีค่าน้อยกว่าดินดังนั้นเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปซึ่งจะไปแทนที่เม็ดดินในส่วนที่เป็นของแข็งจึงทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของดินลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาว

2. ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะ (Optimum moisture content) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปในดิน โครงสร้างของ



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินหนองงูเห่า เมื่อผสมกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ

อนุภาคดินเหนียวจะจัดเรียงตัวแบบระเกะระกะ ทำให้ส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวมีช่องว่างมากความหนาแน่นแห้งจึงต่ำ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้น วงน้ำ double layer จะเริ่มขยายตัวทำให้แรงผลักสูงขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากการซ้อนกันของวงน้ำ double layer ดังนั้นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจึงลดลง โครงสร้างของส่วนผสมจึงจัดเรียงตัวกันมากขึ้น เป็นผลให้ดินมีความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้แล้วการเพิ่มปริมาณปูนขาวจะเป็นการเพิ่ม electrolyte content ทำให้วงน้ำ double layer หดตัวแคบเข้า ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมมากจึงทำให้ส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวมีความต้องการน้ำ (water deficiency) เพิ่มมากขึ้น

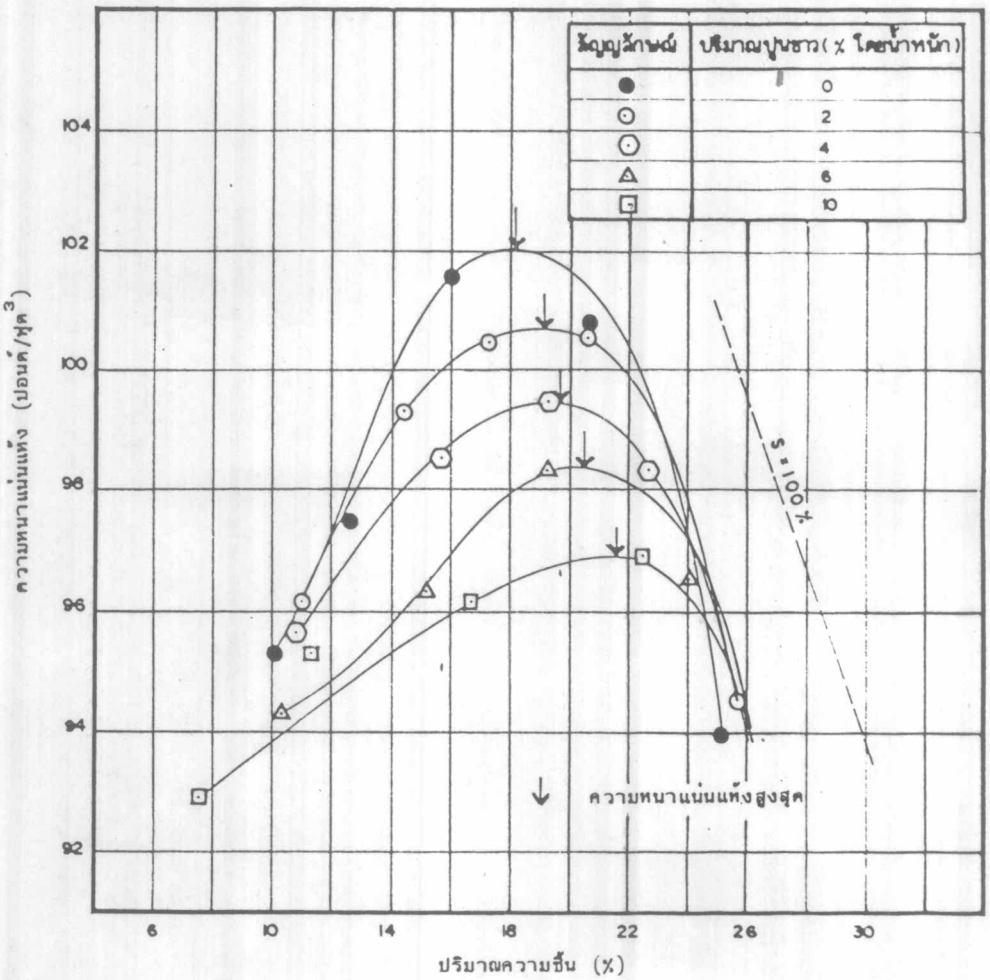
3. ที่ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม 4-10 % จะให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากดินหนองงูเห่ามีปริมาณอินทรีย์สารสูงถึง 2.04 % จึงทำให้การทำปฏิกิริยากันในระยะเวลาอันสั้นของปูนขาวกับอนุภาคดินเหนียวเป็นไปได้ยากเนื่องจาก masking effect ของอินทรีย์สารที่เกาะอยู่ตามผิวของอนุภาคดินเหนียว จึงทำให้ที่ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม 4-10 % ให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะใกล้เคียงกัน แสดงว่าดินหนองงูเห่า ถ้าผสมปูนขาวปริมาณมากกว่า 4 % จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในระยะเวลาอันสั้น การที่ความหนาแน่นแห้งในช่วงปริมาณปูนขาว 4-10 % ของดินหนองงูเห่ามีความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกันแสดงว่าปูนขาวที่เข้าไปแทนที่เม็ดดินซึ่งเป็นของแข็งนี้มีผลน้อยมากต่อการลดลงของความค่าความหนาแน่นแห้ง

5.2.2 ดินพานทอง

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินพานทองสามารถสรุปได้ว่า

1. เมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับตัวอย่างดินหนองงูเห่า

2. เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมแล้วค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ลดลงและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะที่เพิ่มสูงขึ้นจะแปรตามปริมาณปูนขาวที่ผสมเข้าไปอย่างชัดเจน การ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินพานทอง เมื่อผสมกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ

ที่เป็นดังนี้เนื่องมาจากดินพานทองมีปริมาณอินทรีย์สารประมาณ 1.23 % ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าในดินหนองงูเห่า นอกจากนี้ดินพานทองยังมีปริมาณดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. มากกว่าดินหนองงูเห่า จึงทำให้อนุภาคดินเหนียวของดินพานทองสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้ดีกว่าดินหนองงูเห่า

3. ทางด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่พอเหมาะพบว่าที่ปริมาณความชื้นต่ำ ๆ ค่าความหนาแน่นแห้งของทุกส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวมีค่าเกือบเท่ากัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นเข้าไป ค่าความหนาแน่นแห้งเริ่มแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ที่เป็นเช่นนี้เพราะที่ปริมาณความชื้นต่ำนั้นทุกส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว น้ำในช่องว่างของดินจะมี electrolyte content สูงวงน้ำ double layer จะหดแคบ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงโครงสร้างของอนุภาคดินจึงจัดเรียงตัวเป็นแบบระเกะระกะมาก

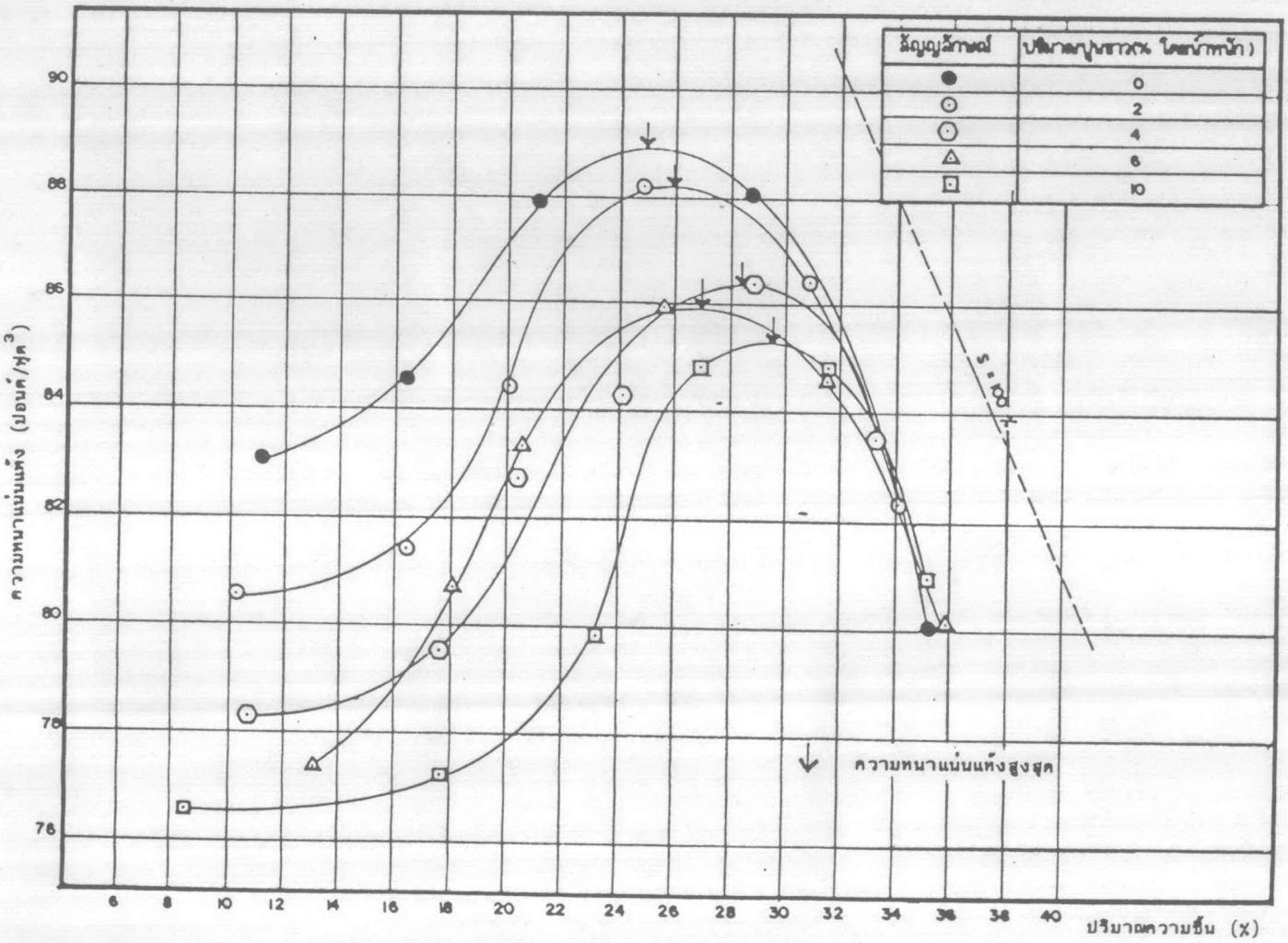
เมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นที่ใช้ผสม เนื่องจากดินที่มีปริมาณปูนขาวต่ำจะมีความต้องการน้ำต่ำกว่าดินที่มีปริมาณปูนขาวสูงกว่า ดังนั้นวงน้ำ double layer จึงขยายตัวได้กว้างกว่าทำให้มีการจัดเรียงตัวได้มากกว่า ดังนั้นดินที่มีปริมาณปูนขาวน้อยกว่าจึงถูกบดอัดได้แน่นกว่า ค่าความหนาแน่นแห้งที่ปริมาณความชื้นเดียวกันจึงสูงกว่าในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวที่มีปริมาณปูนขาวสูงกว่า

เมื่อปริมาณความชื้นเกินกว่าปริมาณความชื้นที่พอเหมาะ อนุภาคดินเหนียวจะมีวงน้ำ double layer ได้ใหญ่สุด ดังนั้นเมื่อเพิ่มความชื้นเข้าไปอีกจึงไม่ช่วยในการบดอัดแต่จะเข้าไปแทนที่เม็ดดินส่วนที่เป็นของแข็งทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น ความหนาแน่นแห้งจึงลดลง

5.2.3 ดินระนอง

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินระนอง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับตัวอย่างดินหนองงูเห่าและดินพานทอง



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นของดินระนอง เมื่อผสมกับปูนขาวที่ปริมาณต่าง ๆ

2. ที่ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม 6 % พบว่าถึงแม้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะต่ำกว่าส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4 % แต่ความชื้นที่พอเหมาะกลับน้อยกว่าในส่วนผสมที่ปริมาณปูนขาว 4 %

5.2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติในการบดอัดของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด

จากการทดลองบดอัดตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อนำตัวอย่างดินตามธรรมชาติมาบดอัดพบว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดเป็นดังนี้

- ดินหนองงูเห่า 90.5 ปอนด์/ฟุต^3
- ดินพานทอง 102.1 ปอนด์/ฟุต^3
- ดินระนอง 89.0 ปอนด์/ฟุต^3

ซึ่งความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตามธรรมชาติ เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย เป็นดังนี้ ดินพานทอง ดินหนองงูเห่าและดินระนอง

2. เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปพบว่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลงและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะ เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ เพิ่มขึ้นในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด ความชื้นที่พอเหมาะจะ เพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ เพิ่มขึ้นในตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิด

3. เมื่อผสมปูนขาว เป็นปริมาณ 10 % ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะลดลง จากความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินตามธรรมชาติที่ถูกบดอัด เป็นลำดับจากมากมาน้อยดังนี้ ดินพานทอง (5.0 %) ดินระนอง (4.15 %) และดินหนองงูเห่า (2.76 %)

4. ปริมาณอินทรีย์สารจะมีผลต่อคุณสมบัติในการบดอัด เป็นอย่างมาก เช่น ในดินหนองงูเห่าพบว่าปริมาณปูนขาวมากกว่า 4 % ไม่ได้ทำให้ความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่พอเหมาะมีค่าแตกต่างกัน

5.3 คุณสมบัติทางด้านกำลังของส่วนผสม

ในการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวเมื่อผสมด้วยปูนขาวสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่า Unconfined Compressive Strength, Q_u เป็นดัชนีที่สำคัญที่จะใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวโดยเฉพาะการศึกษาถึงความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic

เนื่องจากกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวนี้ขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ชนิดของดิน ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม ชนิดของปูนขาว ระยะเวลาในการบ่ม อุณหภูมิในการบ่ม ปริมาณความชื้นเริ่มแรกที่ใช้ผสมและคุณสมบัติตามธรรมชาติของดินเป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรซึ่งถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว ดังนี้คือ

- ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ
- อุณหภูมิในการบ่ม
- ปริมาณความชื้นเริ่มแรกที่ใช้ผสม

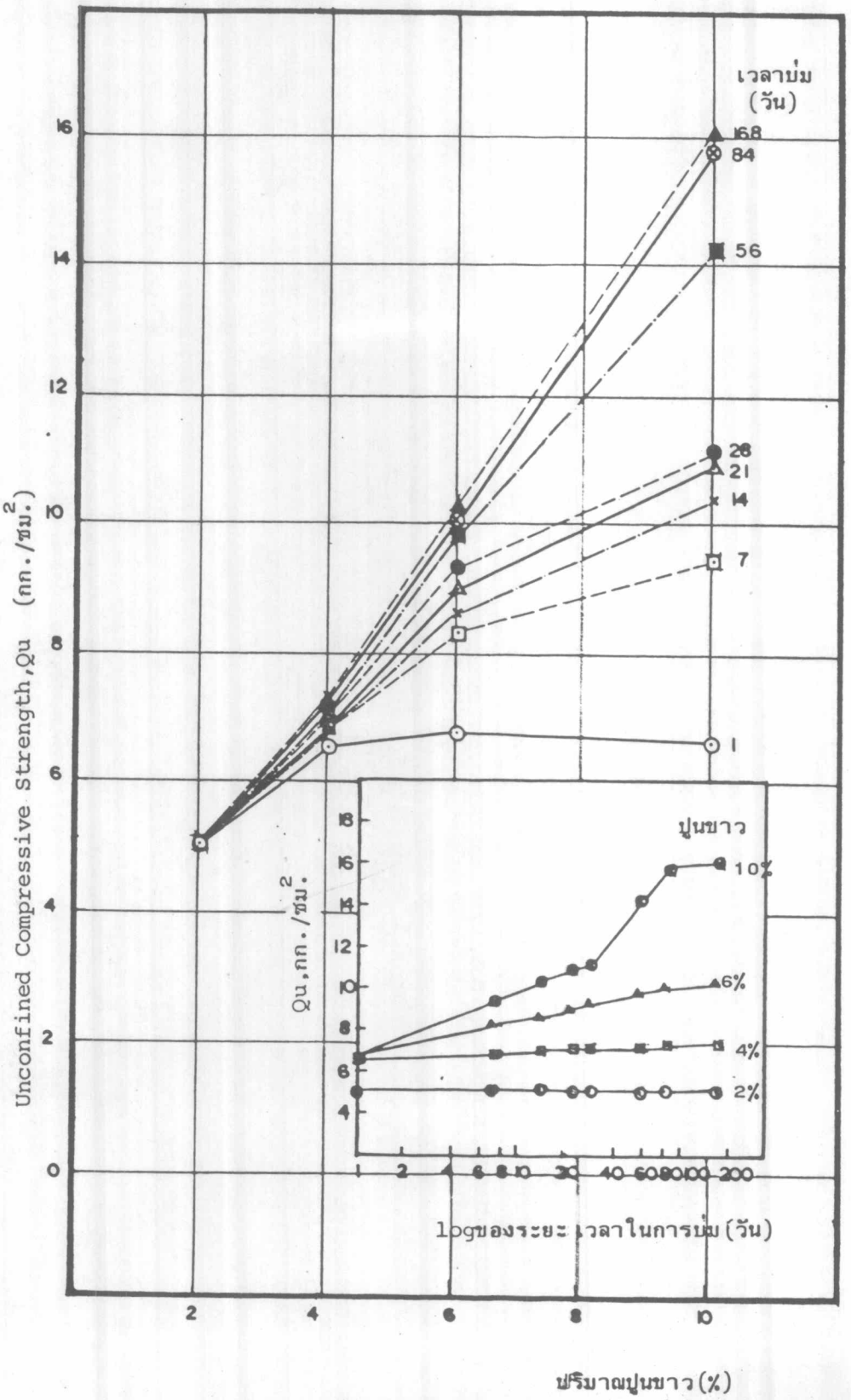
นอกเหนือจากองค์ประกอบที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของส่วนผสมที่ศึกษานี้แล้ว ยังได้ทดลองนำเอาทรายละเอียดเข้ามาผสมเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวเมื่อผสมทรายละเอียดเข้าไป

5.3.1 การพัฒนากำลังของดินที่อัดราส่วนผสมปูนขาวและระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ

เนื่องจากกำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวนี้ขึ้นกับองค์ประกอบหลาย ๆ อย่างดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งคุณสมบัติตามธรรมชาติของดินเป็นองค์ประกอบหนึ่ง ดังนั้นผลการทดลองจะชี้แจงรายละเอียดตามชนิดของดินดังนี้

5.3.1 ก. ดินหนองงูเห่า

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength, Q_u กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ พบว่ากำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมและระยะเวลาในการบ่ม



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่างๆ และค่า Qu กับ log ของระยะเวลาในการบ่มที่ปริมาณปูนขาวต่างๆของดินหนองงูเห่า

ทั้งนี้ เนื่องจากปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับดิน เหนียวซึ่งสามารถแบ่งออก เป็น 2 ขั้นตอนคือ

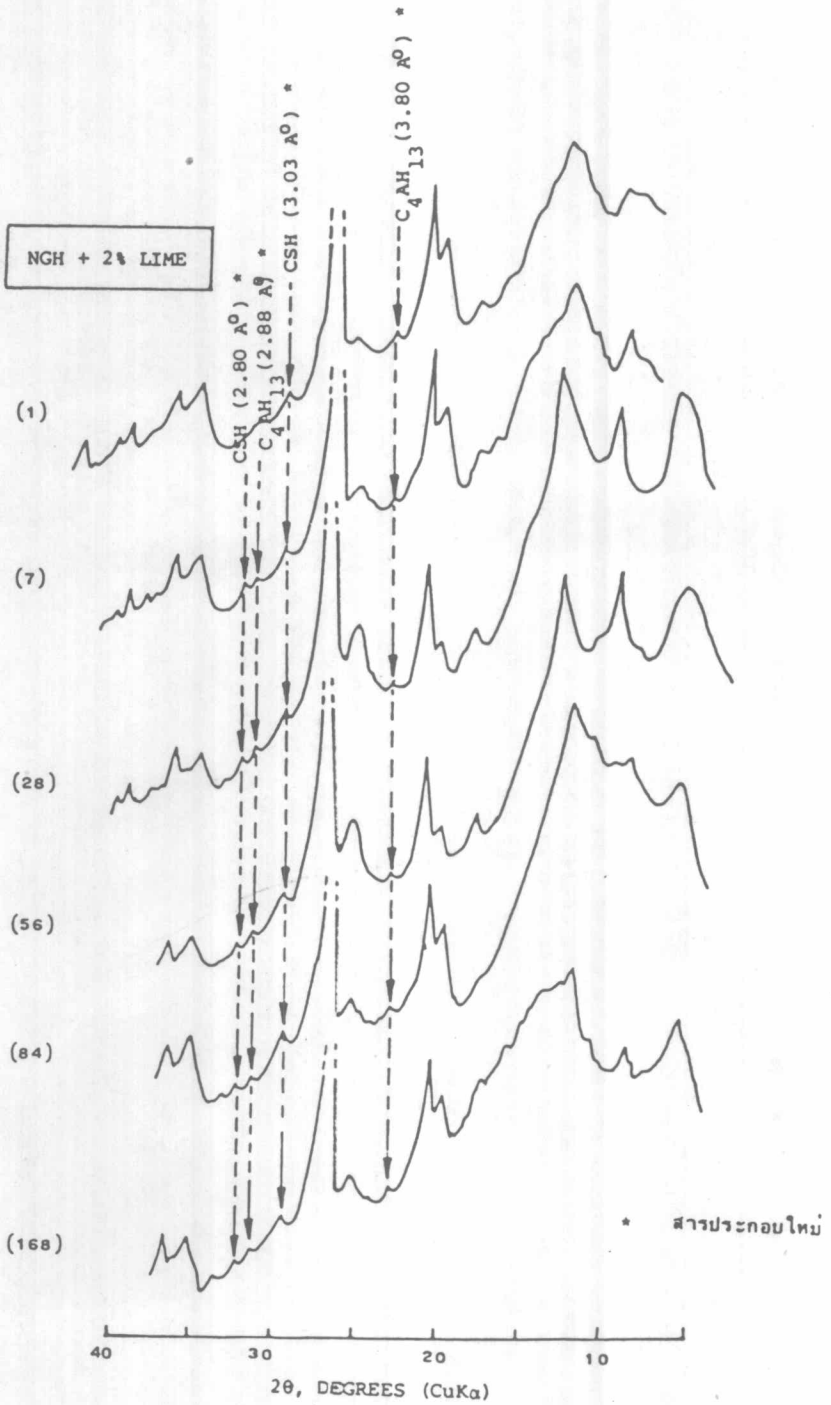
1. ปฏิกิริยา Cation exchange คือการที่ Ca^{2+} จากปูนขาว เข้าไปแทนที่ cation ที่สามารถถูกแทนที่ได้ในดินซึ่งจะมีผลทำให้วงน้ำ double layer ของดินมีการ เปลี่ยนแปลงยังผลให้การจัด เรียงตัว เป็นโครงสร้างของอนุภาคดิน เหนียว เปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้น คุณสมบัติทางวิศวกรรมบางอย่าง เช่น plasticity ของดินจะ เปลี่ยนแปลงไป (Herzog และ Mitchell, 1963) โดยที่ปฏิกิริยานี้จะ เกิดขึ้นทันที เมื่อผสมปูนขาว เข้าไปในดิน เหนียวอย่างทั่วถึง

2. ปฏิกิริยา Pozzolanic คือการรวมตัวระหว่าง CaO ในปูนขาวกับอ๊อกไซด์อิสระในดินโดย เฉพาะซิลิก้าและอลูมินา เกิด เป็นสารประกอบใหม่พวกแคล เซี่ยมซิลิ เกต และอลูมิ เนียมซิลิ เกตซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นตัวประสาน เช่น เดียวกับตัวประสานที่ เกิดในซี เมนต์ ปฏิกิริยานี้จะ เกิดขึ้นมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับปริมาณปูนขาวและระยะ เวลา

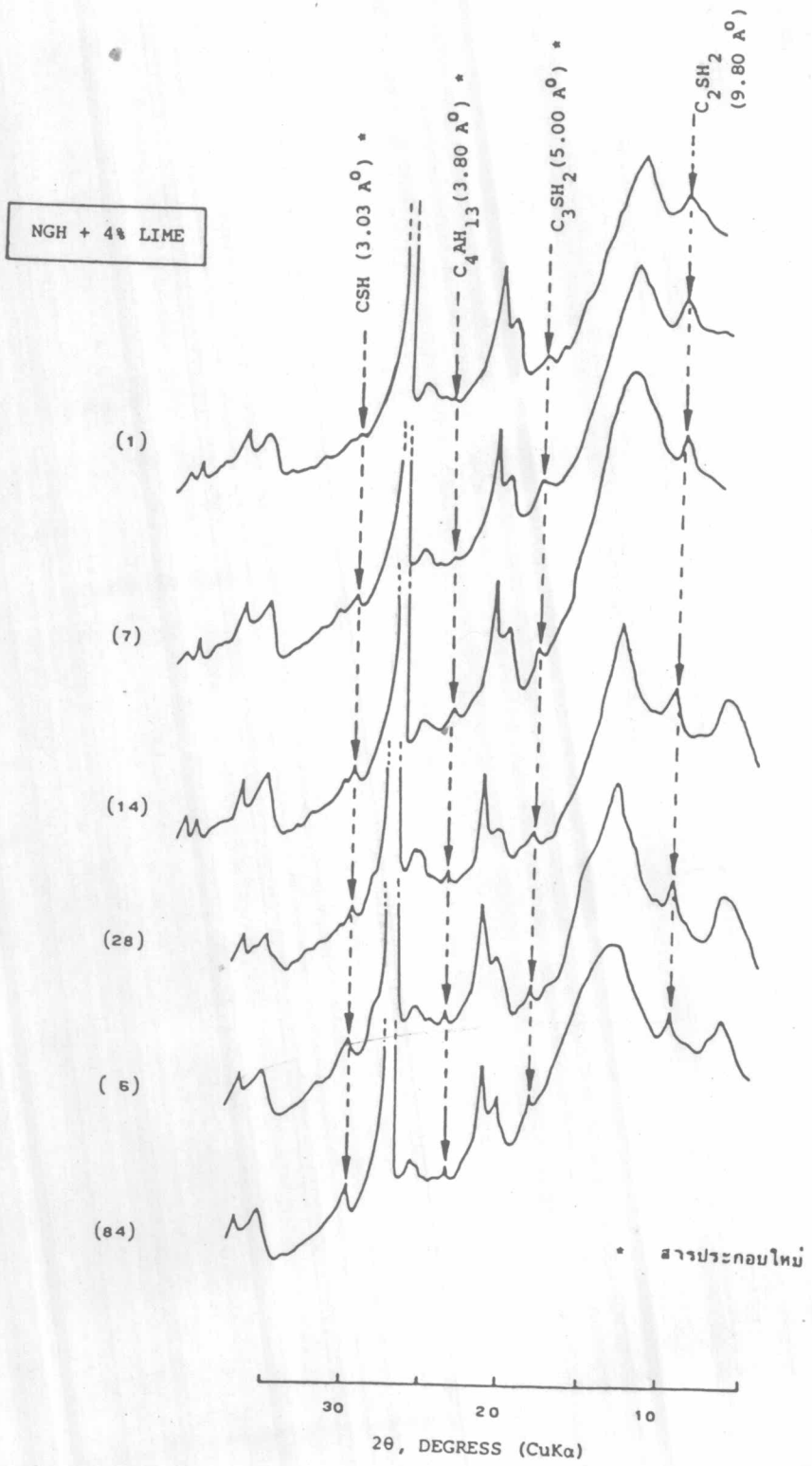
รูปที่ 5.8 ถึง 5.11 แสดงผลการศึกษา X-ray diffraction ภายหลังการทดลองหาค่า Unconfined Compressive Strength ของดินหนองงู เห่า เมื่อผสมด้วยปูนขาวปริมาณต่าง ๆ ที่ระยะ เวลาในการบ่มต่าง ๆ กันพบว่ามีสารประกอบใหม่ เกิดขึ้น ดังนี้

CSH	พบที่	peak	2.80 และ 3.80 A°
C_4AH_{13}	พบที่	peak	2.88, 3.80 และ 8.50 A°
C_3SH_2	พบที่	peak	5.00 A°
C_2SH_2	พบที่	peak	9.80 A°

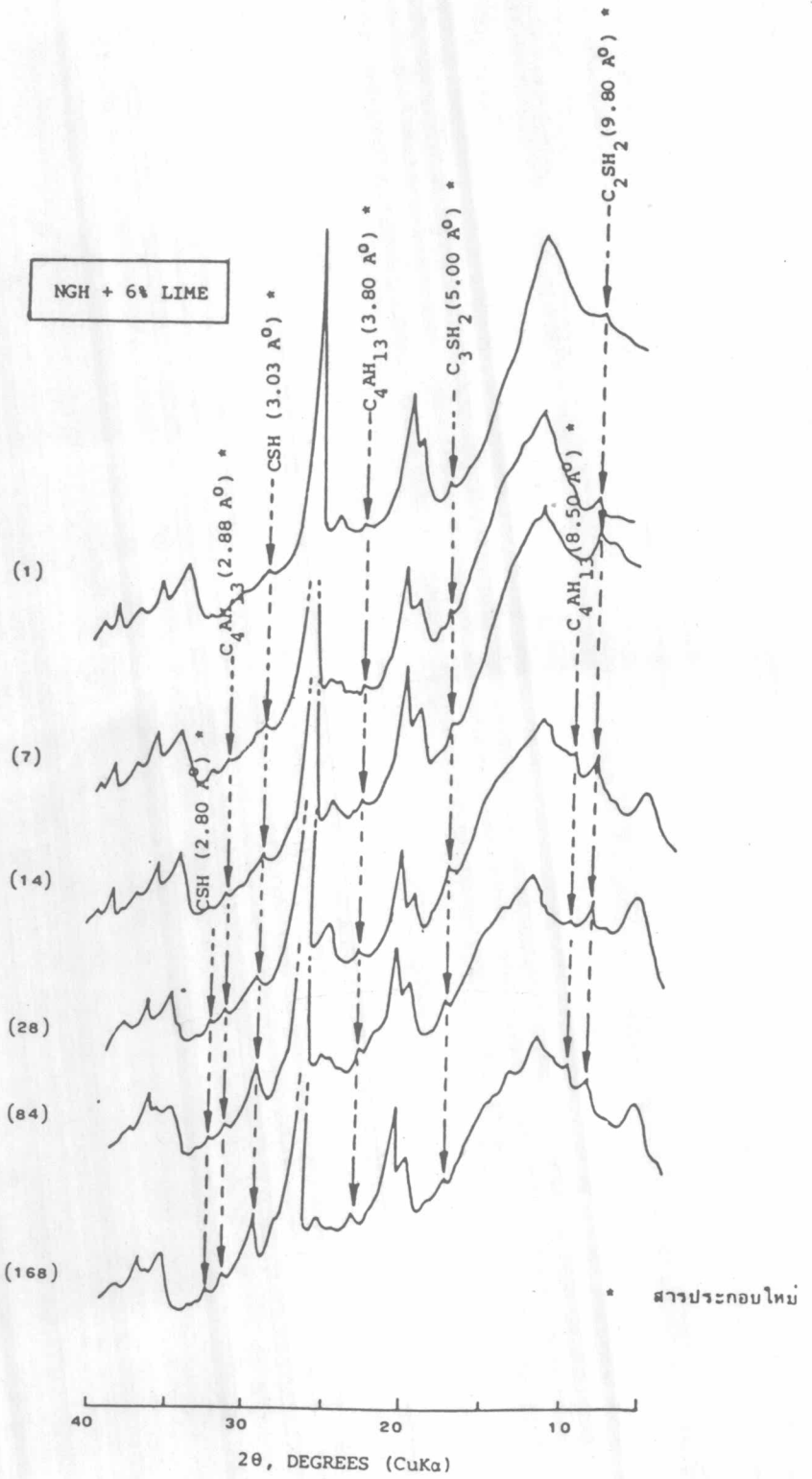
ในดินหนองงู เห่านี้พบว่าที่ปริมาณปูนขาวใช้ผสมน้อยกว่า 4 % เมื่อระยะ เวลาในการบ่ม เพิ่มขึ้น ค่า Qu ไม่ได้ เพิ่มสูงขึ้นตาม ทั้งนี้ เพราะที่ปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 4 % ปูนขาวจะทำปฏิกิริยา cation exchange กับอนุภาคดิน เหนียวและถูกดูดซึมโดยอินทรีย์สารไป เกือบหมด จึงไม่ เหลือปูนขาว เพียงพอที่จะไปทำปฏิกิริยา pozzolanic ต่อไปได้ กล่าวคือการ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในส่วนผสมดิน เหนียว-ปูนขาวที่ปริมาณนี้สืบ เนื่องมาจากปฏิกิริยา cation exchange เป็นส่วนใหญ่



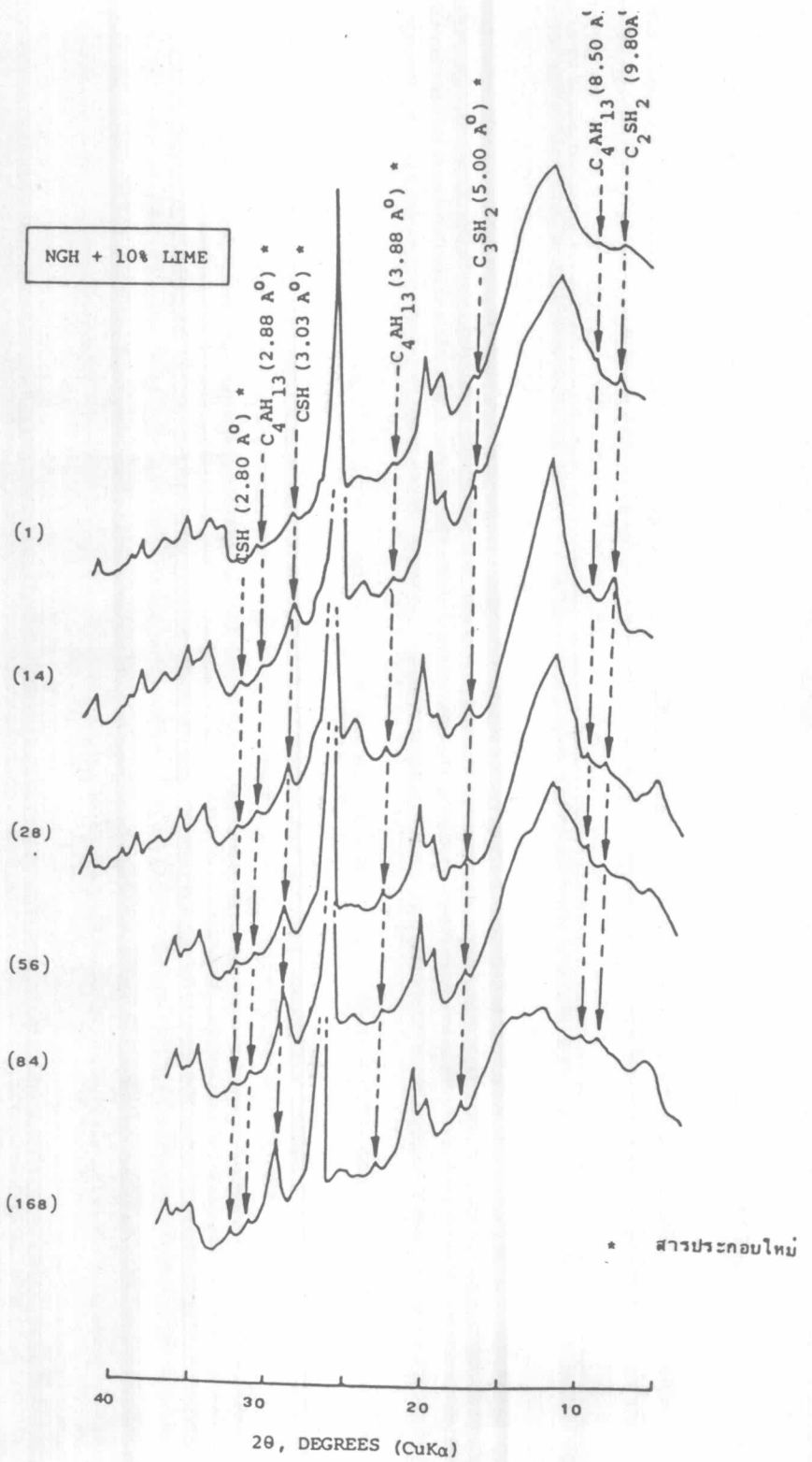
รูปที่ 5.8 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 2 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 28, 56, 84 และ 168 วัน



รูปที่ 5.9 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 4 % ที่ระเวลาในการบ่ม 1, 7, 14, 28, 56 และ 84 วัน



รูปที่ 5.10 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 14, 28, 84 และ 168 วัน



รูปที่ 5.11 X-ray diffraction pattern ของดินหนองงูเห่าผสมปูนขาว 10 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 14, 28, 56, 84 และ 168 วัน

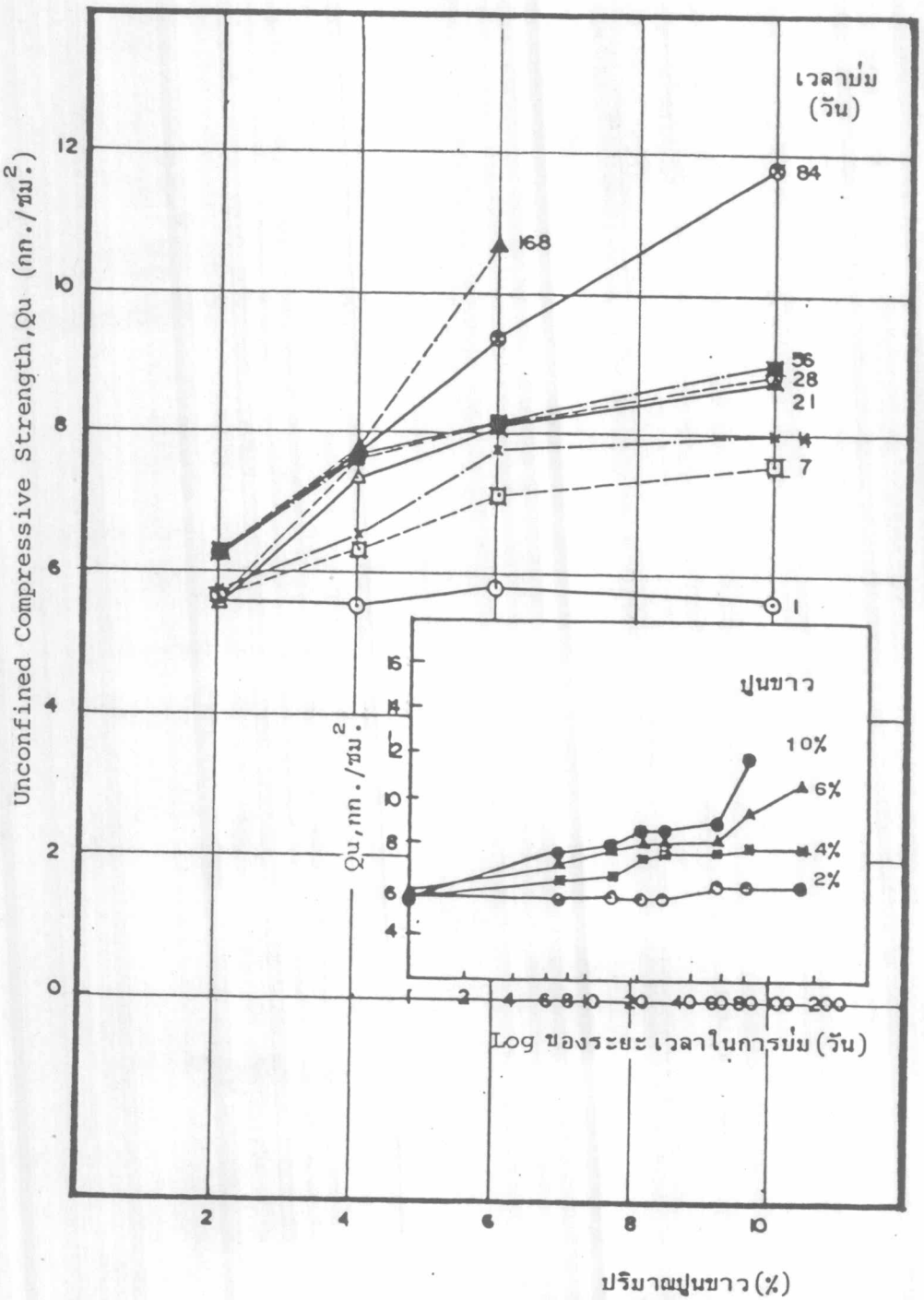
จาก X-ray diffraction pattern ของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว 2 % และ 4 % (รูปที่ 5.8 และ 5.9 ตามลำดับ) พบว่ามีสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นคือ CSH, C_4AH_{13}, C_3SH_2 และ C_2SH_2 ทั้งนี้เป็นเพราะจากการวิเคราะห์ส่วนผสมของดินหนองงูเห่าในบทที่ 4 พบว่ามีแร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์เป็นส่วนประกอบประมาณ 35 % ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. ซึ่งแร่ดินเหนียวชนิดนี้เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปจะเริ่มทำปฏิกิริยา pozzolanic ทันทีก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานขึ้นระหว่างอนุภาคดินเหนียวและจะยึดเหนี่ยวแต่ละอนุภาคให้มีความมั่นคงขึ้นแต่ยังไม่มั่นคงเพียงพอที่จะทำให้กำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวเพิ่มสูงขึ้น (Herrin และ Mitchell, 1961)

นอกจากนี้พบว่าดินหนองงูเห่าเมื่อผสมปูนขาวปริมาณมากกว่า 4 % ขึ้นไปจะมีการพัฒนากำลังเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มเพราะส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะมีปูนขาวส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา cation exchange และถูกดูดซึมโดยอินทรีย์สารมากขึ้น ดังนั้นปูนขาวส่วนที่เหลือจะเข้าทำปฏิกิริยา pozzolanic กับดินเหนียวได้มากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นโดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาเพียง 1 วันและจะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น

ที่ปริมาณปูนขาว 10 % พบว่าอัตราการเพิ่มของกำลังของส่วนผสมที่ระยะเวลาในการบ่มระหว่าง 30 ถึง 84 วันจะมีค่าสูงมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณปูนขาว 10 % นี้เพียงพอที่ดินหนองงูเห่าจะทำปฏิกิริยา cation exchange จนแร่ดินเหนียวพวก three layer mineral บางส่วนอิ่มตัวด้วย Ca^{2+} และโครงสร้างของแร่ดินเหนียวส่วนนี้เกิดการพังทะลายเป็นสารประกอบพวกซิลิก้าและอลูมิน่าที่ระยะเวลาในการบ่มก่อน 30 วัน ดังนั้นจึงมีซิลิก้าและอลูมิน่ามาทำปฏิกิริยา pozzolanic เพิ่มสูงขึ้น (Eades และ Grim, 1960) จนซิลิก้าและอลูมิน่าที่ได้มาโดยขบวนการนี้ทำปฏิกิริยา pozzolanic หมดลงที่ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 84 วัน ดังนั้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มเกิน 84 วันแล้วอัตราการเพิ่มของกำลังจึงลดลง

5.3.1 ข. ดินพานทอง

รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ ของดินพานทองซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากำลังของส่วน



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะ เวลาในการบ่มต่างๆ และค่า Qu กับ log ของระยะ เวลาในการบ่มที่ปริมาณปูนขาวต่างๆของดินพานทอง

ผสมดินเหนียว-ปูนขาวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมและระยะเวลาในการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา cation exchange และปฏิกิริยา pozzolanic ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในดินหนองงูเห่า

รูปที่ 5.13 ถึง 5.16 แสดงผลการศึกษา X-ray diffraction ของดินพานทอง เมื่อผสมปูนขาวปริมาณต่าง ๆ ที่ระยะเวลาในการบ่มต่างกันพบว่าเกิดสารประกอบใหม่ขึ้นดังนี้

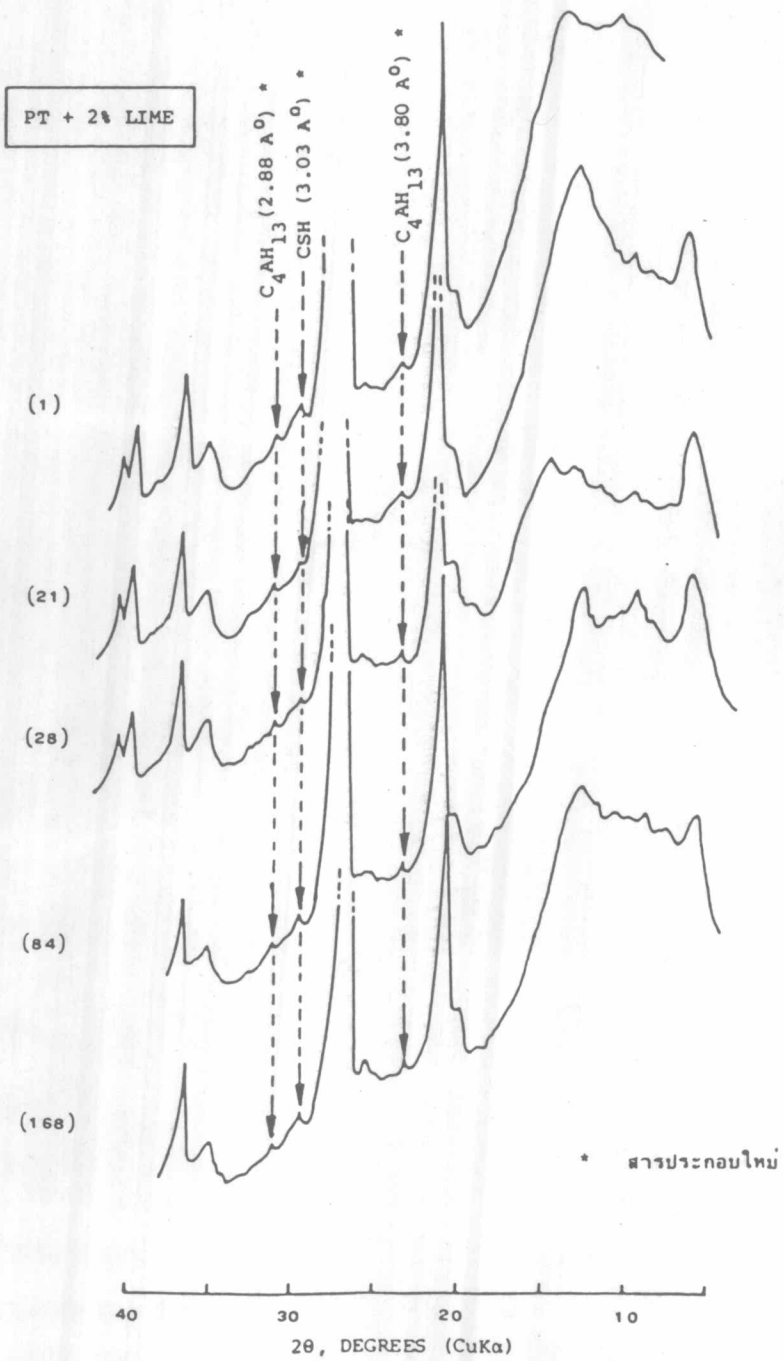
CSH พบที่ peak 2.80 และ 3.03 A°

C_4AH_{13} พบที่ peak 2.88 และ 3.80 A°

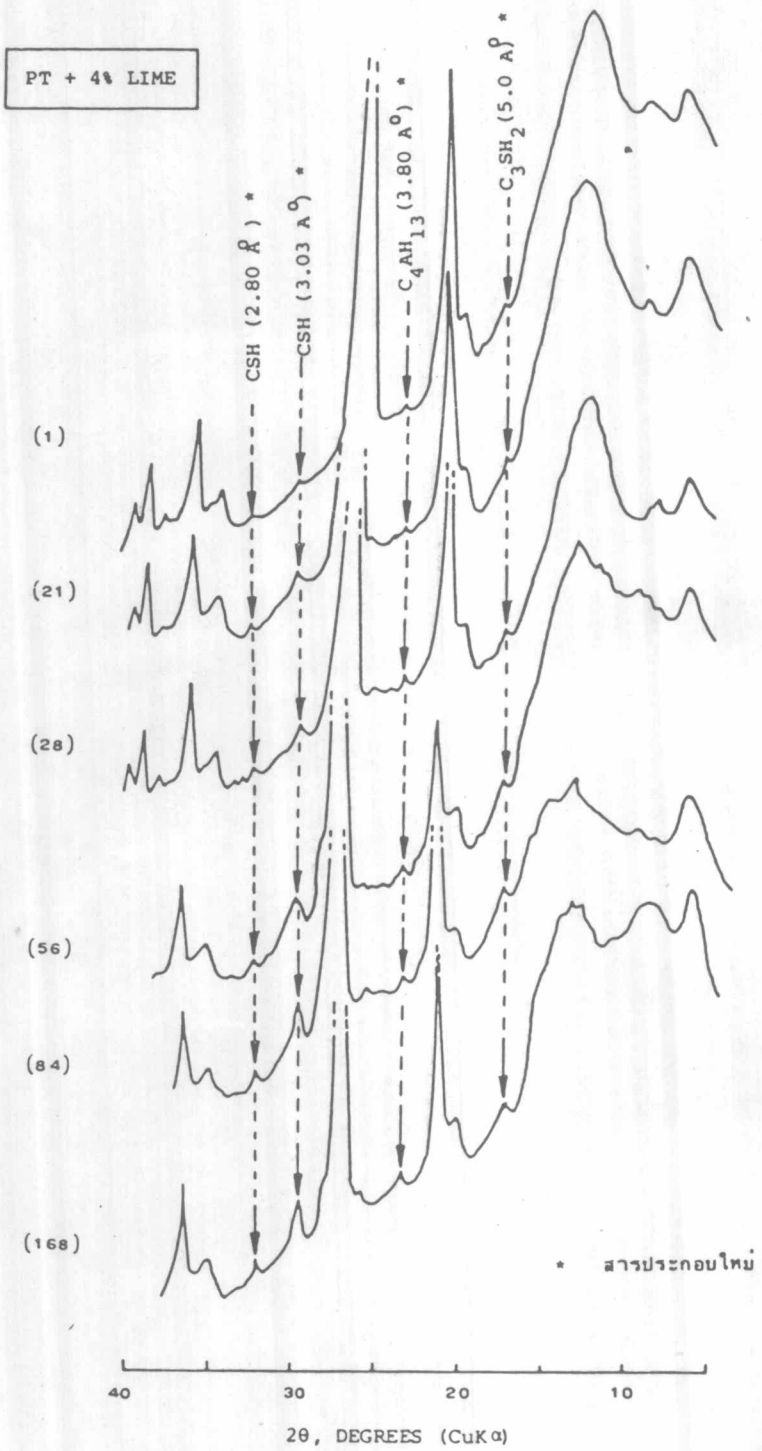
นอกจากนี้พบว่าดินพานทองเมื่อผสมกับปูนขาวปริมาณน้อยกว่า 2 % เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้น ค่า Qu ไม่ได้เพิ่มสูงขึ้นตาม แสดงว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยา pozzolanic ก็ไม่ได้เกิดเพิ่มขึ้นเลยทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวปริมาณ 2 % นี้จะทำปฏิกิริยา cation exchange และถูกดูดซึมโดยอินทรีย์สารไปเกือบหมดจึงไม่มีปูนขาวเหลือเพียงพอที่จะไปทำปฏิกิริยา pozzolanic ต่อไป

เมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมมากกว่า 2 % พบว่าจะมีการพัฒนากำลังสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณปูนขาวเข้าไปทำให้มีปูนขาวส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา cation exchange และถูกดูดซึมโดยอินทรีย์สารเข้ามาทำปฏิกิริยา pozzolanic ได้มากขึ้น ยิ่งเมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มมากขึ้นโอกาสการเกิดปฏิกริยา pozzolanic ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวจึงมีกำลังเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น

ส่วนผสมดินเหนียวที่ผสมปูนขาวปริมาณมากกว่า 6 % และบ่มเป็นระยะเวลามากกว่า 60 วันพบว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากดินพานทองประกอบด้วยแร่ดินเหนียวพวก three layer mineral ได้แก่ อิลไลท์และมอนท์โมริลโลไนท์เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเมื่อแร่ดินเหนียวบางส่วนอิ่มตัวด้วย Ca^{2+} แล้วโครงสร้างของแร่ดินเหนียวจะเกิดการพังทะลายเป็น ซิลิก้าและอลูมิน่า ในช่วงระยะเวลาก่อน 60 วัน ทำให้มีปริมาณอ๊อกไซด์ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมในส่วนผสม จึงทำให้ปฏิกิริยา pozzolanic ที่เพิ่มมากขึ้นยังผลให้อัตราการเพิ่มของกำลังในส่วนผสมจึงเพิ่มมากขึ้น จากศึกษาผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction

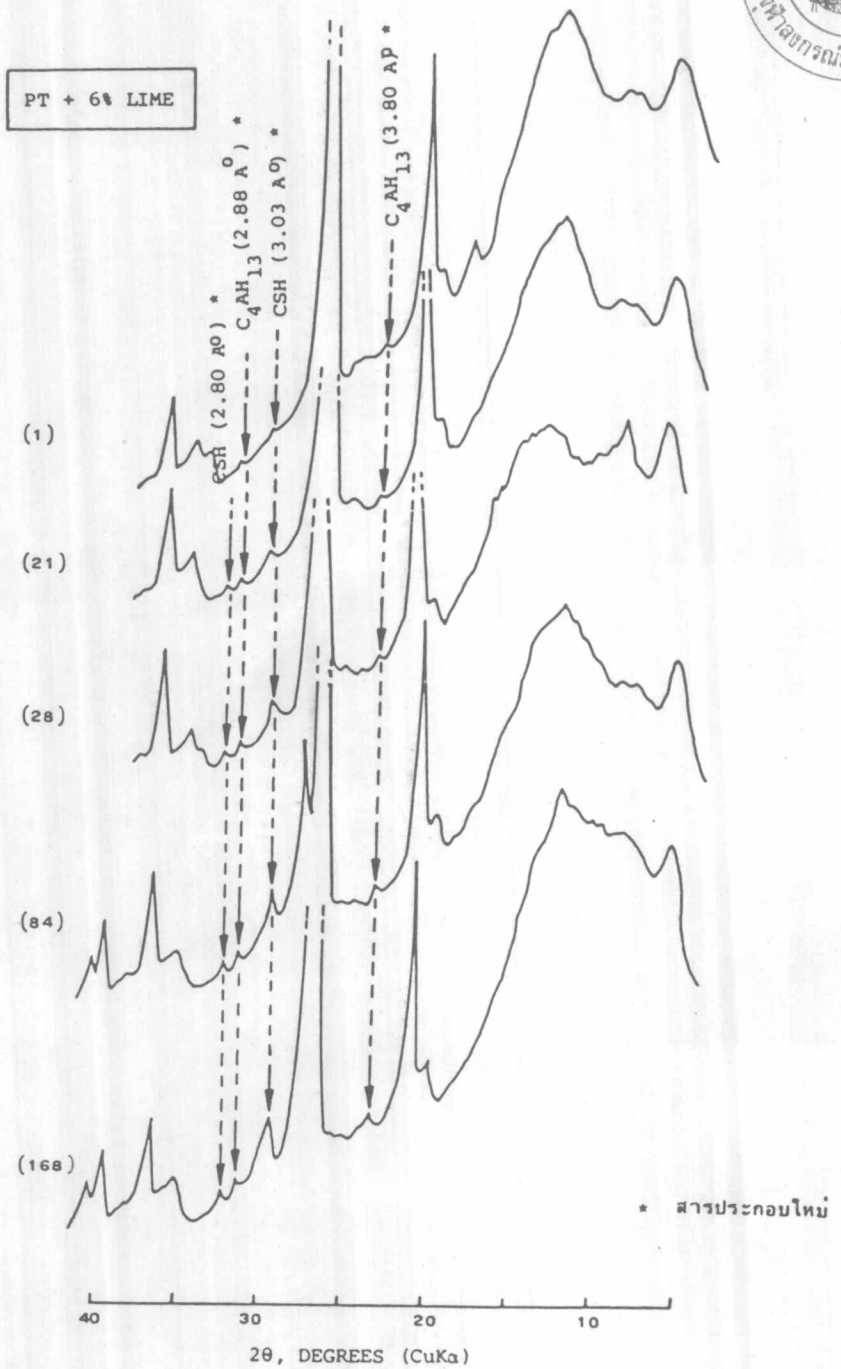


รูปที่ 5.13 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 2 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 84 และ 168 วัน

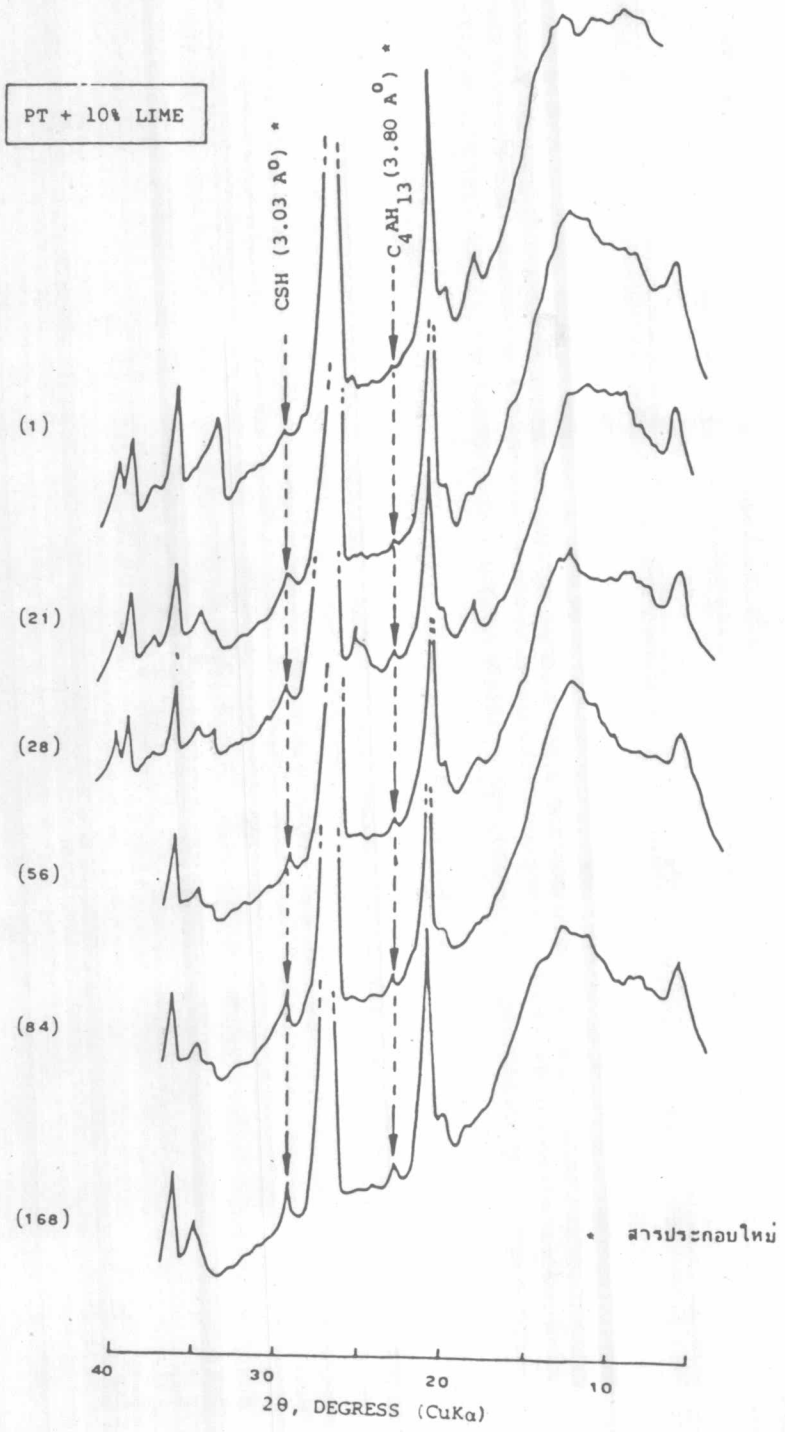


รูปที่ 5.14 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 4 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 56, 84 และ 168 วัน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.15 X-ray diffraction pattern ของดินพานทองผสมปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28 84 และ 168 วัน



รูปที่ 5.16 X-ray diffraction pattern ของดินหานทองผสมปูนขาว 10 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 21, 28, 56, 84 และ 168 วัน

พบว่าที่มุม 2θ ระหว่าง 6.3 ถึง 12.6 ($7A^{\circ}$-$14A^{\circ}$, CuKα) ส่วนใหญ่จะแสดงถึงแร่ดินเหนียวในส่วนประกอบ พบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นความเข้มและความชัดเจนของ peak ที่ได้ในบริเวณนี้จะลดน้อยลง ซึ่งแสดงถึงการสลายตัวของแร่ดินเหนียว นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า ดินพานทองจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา pozzolanic อย่างรวดเร็วมาก แม้ระยะเวลาในการบ่มจะเป็นเพียง 1 วัน แล้วปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น

5.3.1 ค. ดินระนอง

รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_u กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะเวลาในการบ่มต่าง ๆ ของดินระนองพบว่า เมื่อผสมปูนขาวเข้าไปจะทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว เพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะดินระนองจะทำปฏิกิริยากับปูนขาวเป็น 2 ขั้นตอน เช่นเดียวกับดินหนองงูเห่าและดินพานทอง

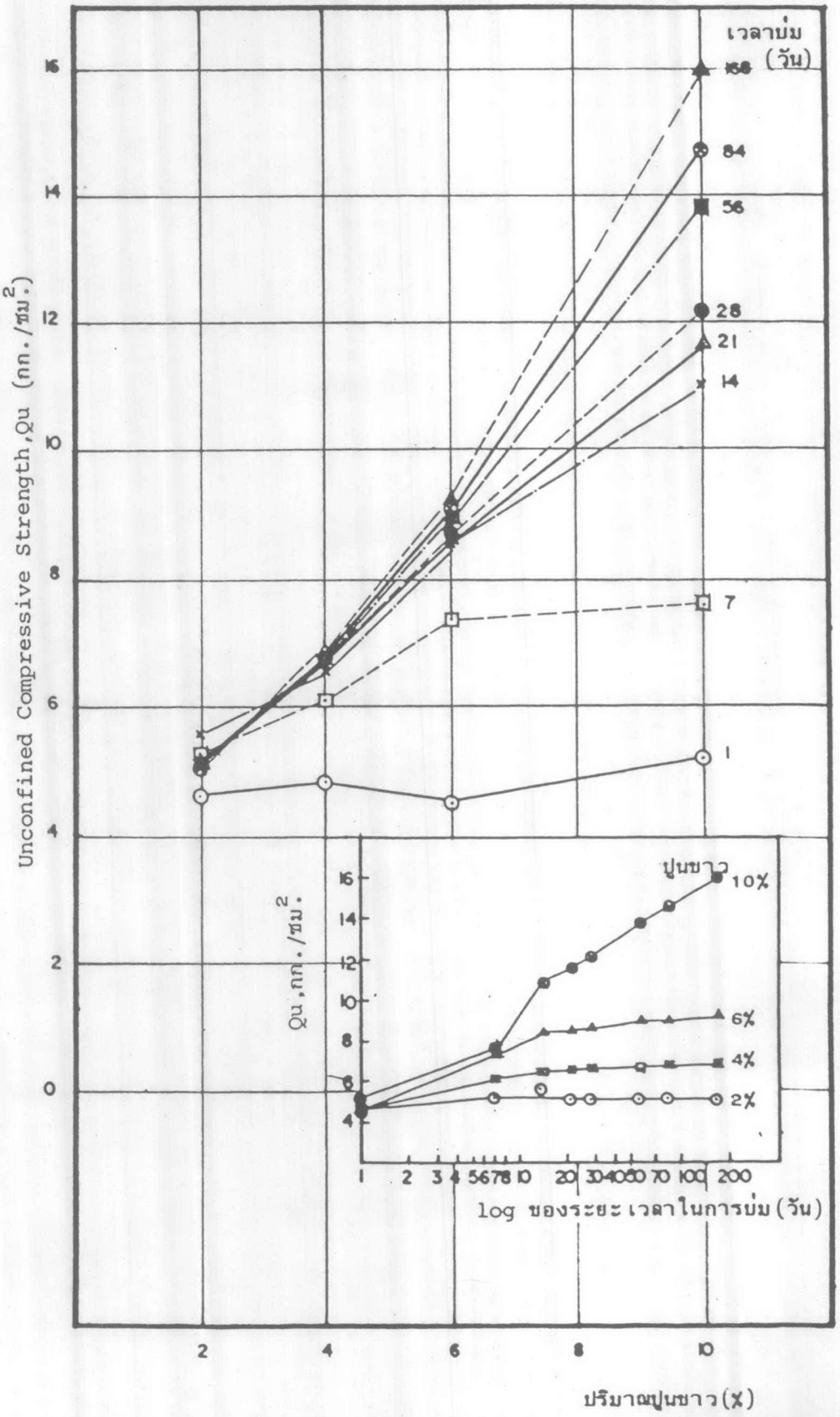
รูปที่ 5.18 ถึง 5.21 แสดงผลการวิเคราะห์ X-ray diffraction ของดินระนองพบว่าเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปจะทำให้เกิดสารประกอบใหม่ดังนี้

CSH พบที่ peak 2.80 และ 3.03 A°

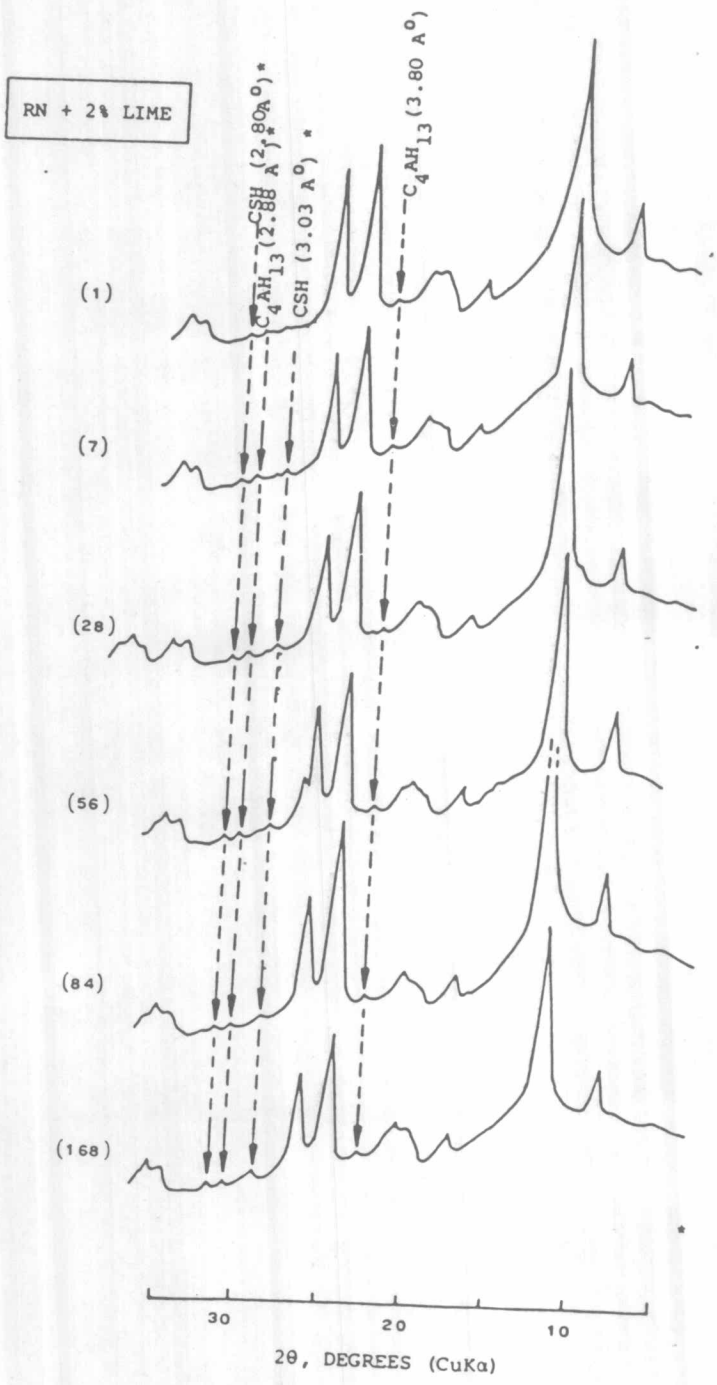
C_4AH_{13} พบที่ peak 2.88 และ 3.80 A°

ดินระนองเมื่อผสมปูนขาวเล็กน้อยแม้จะเป็นปริมาณเพียง 2 % ก็ยังคงทำให้กำลังของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวนี้เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาในการบ่ม ที่เป็นเช่นนี้เพราะจากการวิเคราะห์ส่วนประกอบของดินระนองพบว่า ดินระนองประกอบด้วยแร่ดินเหนียวอิลไลท์และคาโอลิไนท์ โดยแร่ดินเหนียวคาโอลิไนท์เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ ดังนั้นเมื่อผสมปูนขาวเข้าไปก็จะเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในส่วนผสมทันที (Eades และ Grim, 1960) และนอกจากนี้ดินระนองมีปริมาณอินทรีย์สารผสมอยู่ด้วยน้อยมาก ดังนั้นปูนขาวที่ผสมเข้าไปจะทำปฏิกิริยากับแร่ดินเหนียวได้เต็มที่

เมื่อปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้นค่า Q_u ของส่วนผสมจะเพิ่มสูงขึ้นตามที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมจะทำให้มีปูนขาวมาทำปฏิกิริยา

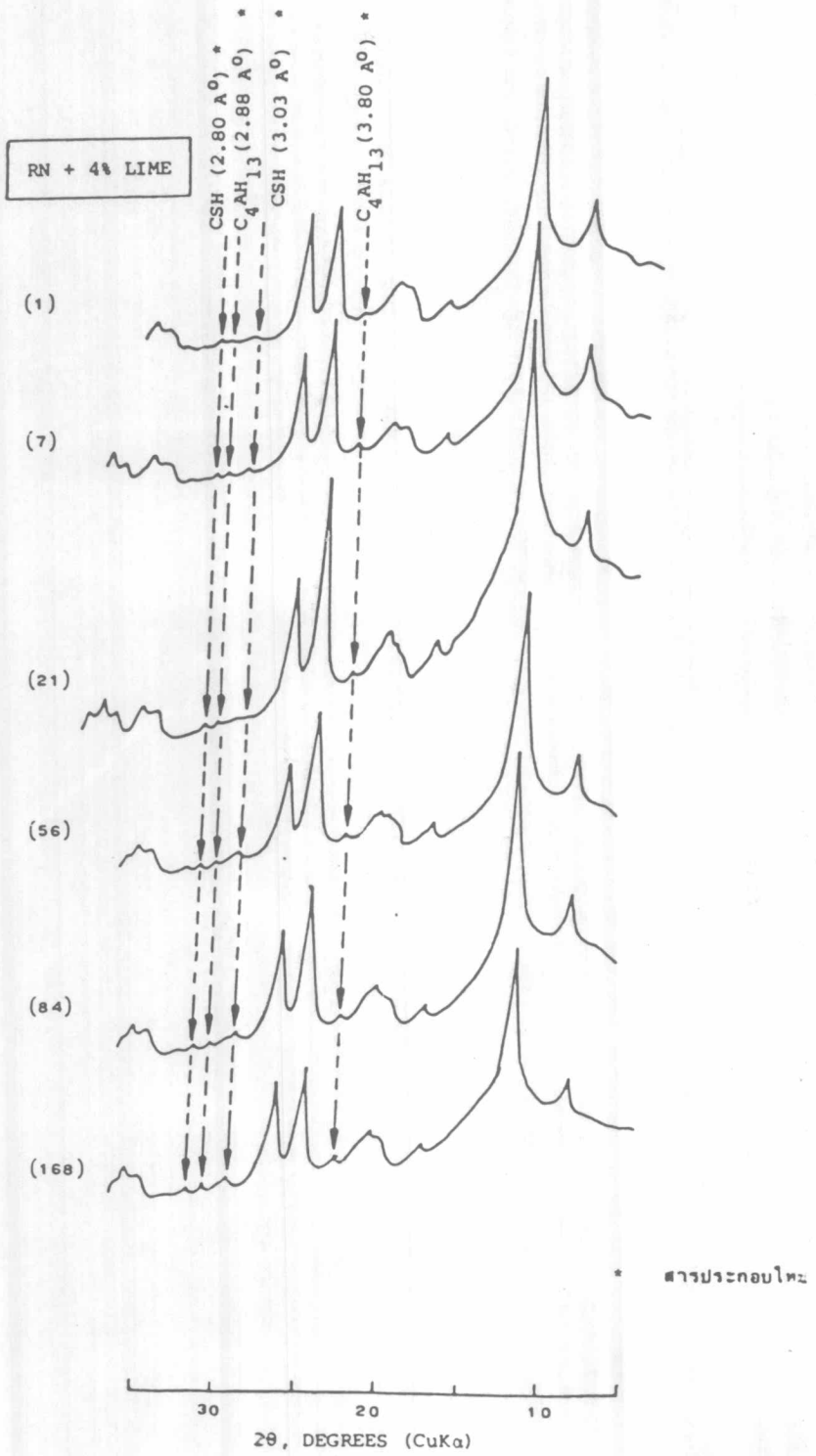


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมที่ระยะ เวลาในการบ่มต่างๆ และค่า Qu กับ log ของระยะ เวลาในการบ่มที่ปริมาณปูนขาวต่าง ๆ ของดินระนอง

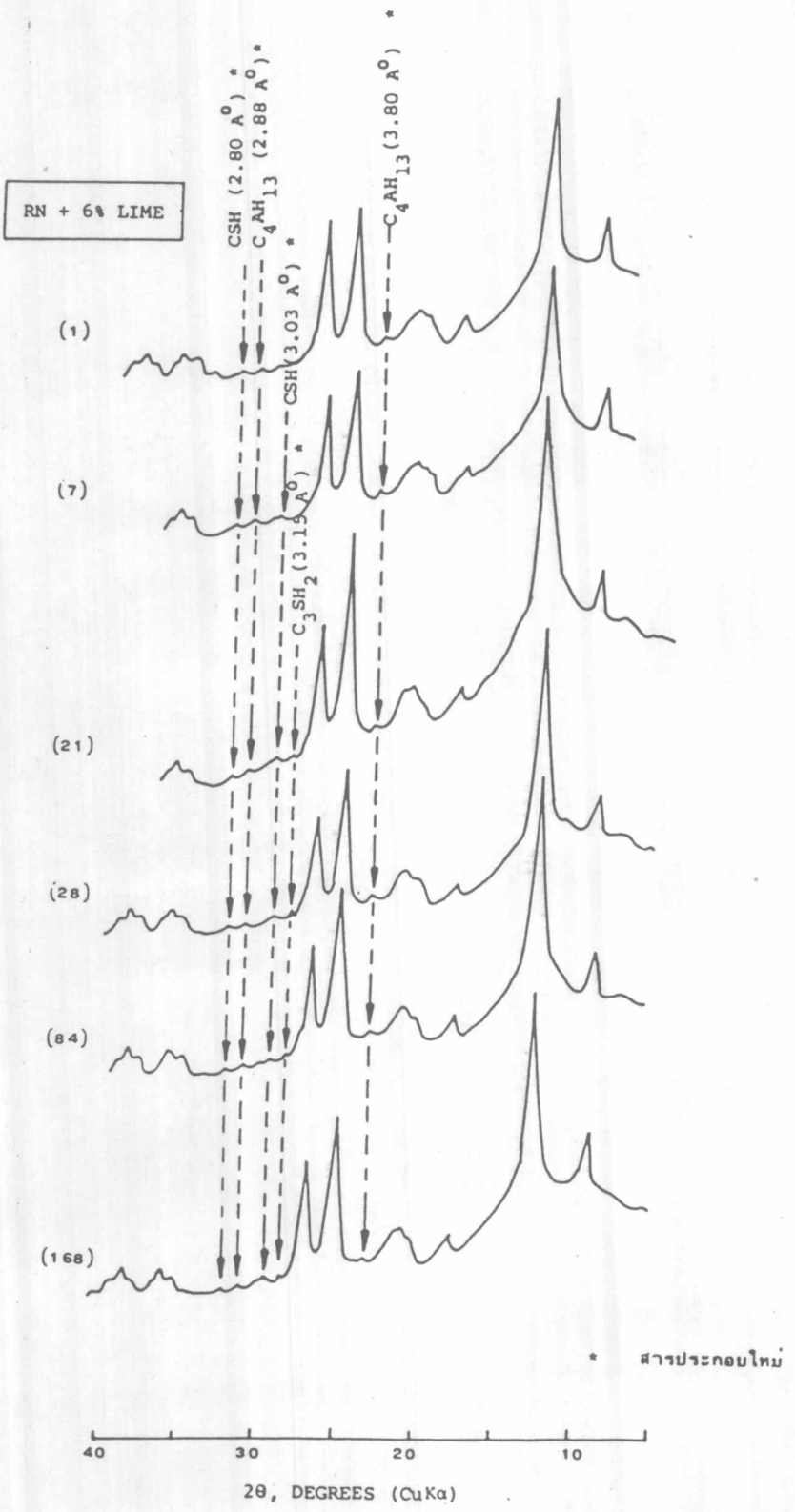


* สารประกอบที่เกิดใหม่

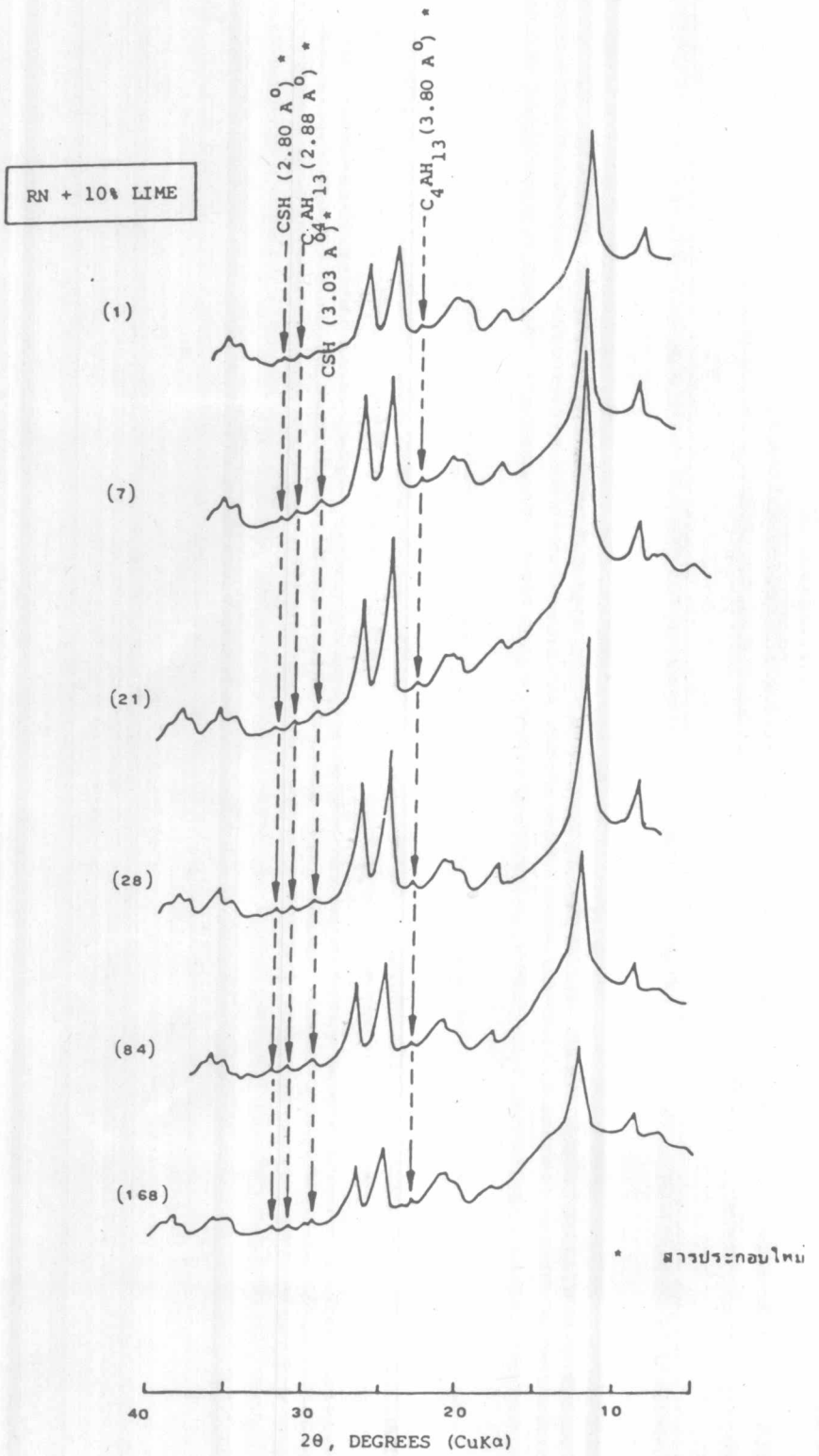
รูปที่ 5.18 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 2 %
ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 28, 56, 84 และ 168 วัน



รูปที่ 5.19 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 4 %
ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 21, 56, 84 และ 168 วัน



รูปที่ 5.20 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 21, 28 84 และ 168 วัน



รูปที่ 5.21 X-ray diffraction pattern ของดินระนองผสมปูนขาว 10 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1, 7, 21, 28, 84 และ 168 วัน

pozzolanic กับดินเหนียวเพิ่มมากขึ้น ค่า Qu จึงเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสมและระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น (Ruff และ Ho, 1966)

ที่ปริมาณปูนขาวที่ใช้ผสม 10 % พบว่าอัตราการเพิ่มของกำลังของส่วนผสมที่ระยะเวลาในการบ่มระหว่าง 7-14 วันจะมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เพราะดินระนองมีส่วนประกอบเป็นแร่ดินเหนียว อิลไลท์ ซึ่งเป็นพวก three layer mineral เพียงปริมาณเล็กน้อย ดังนั้น แร่ดินเหนียวอิลไลท์เมื่อทำปฏิกิริยา cation exchange จนอิ่มตัวด้วย Ca^{2+} ก็จะทำให้โครงสร้างของแร่ดินเหนียวส่วนนี้พังทะลายลง เป็นสารประกอบพวกซิลิก้าและอลูมิน่าในส่วนผสม กำลังในช่วงนี้มีค่าสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาในการบ่มเกินกว่า 14 วันไปแล้ว อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจะลดลง เนื่องจากอ๊อกไซด์ของสารที่เกิดมาจากการพังทะลายของโครงสร้างแร่ดินเหนียวพวก three layer ได้ทำปฏิกิริยา pozzolanic ไปเกือบหมดแล้ว สำหรับในดินระนองนี้พบว่าปฏิกิริยา pozzolanic เกิดขึ้นเร็วมาก เช่นเดียวกับในดินหนองงูเห่าและดินพานทองและปฏิกิริยานี้จะดำเนินต่อไปเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น

5.3.2 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มกำลังในส่วนผสมของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด

รูปที่ 5.22 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มกำลังในส่วนผสมดินเหนียวปูนขาวของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด โดยอัตราการเพิ่มกำลังในส่วนผสมที่ใช้เป็นดัชนีในการเปรียบเทียบนี้จะมีค่าเท่ากับ

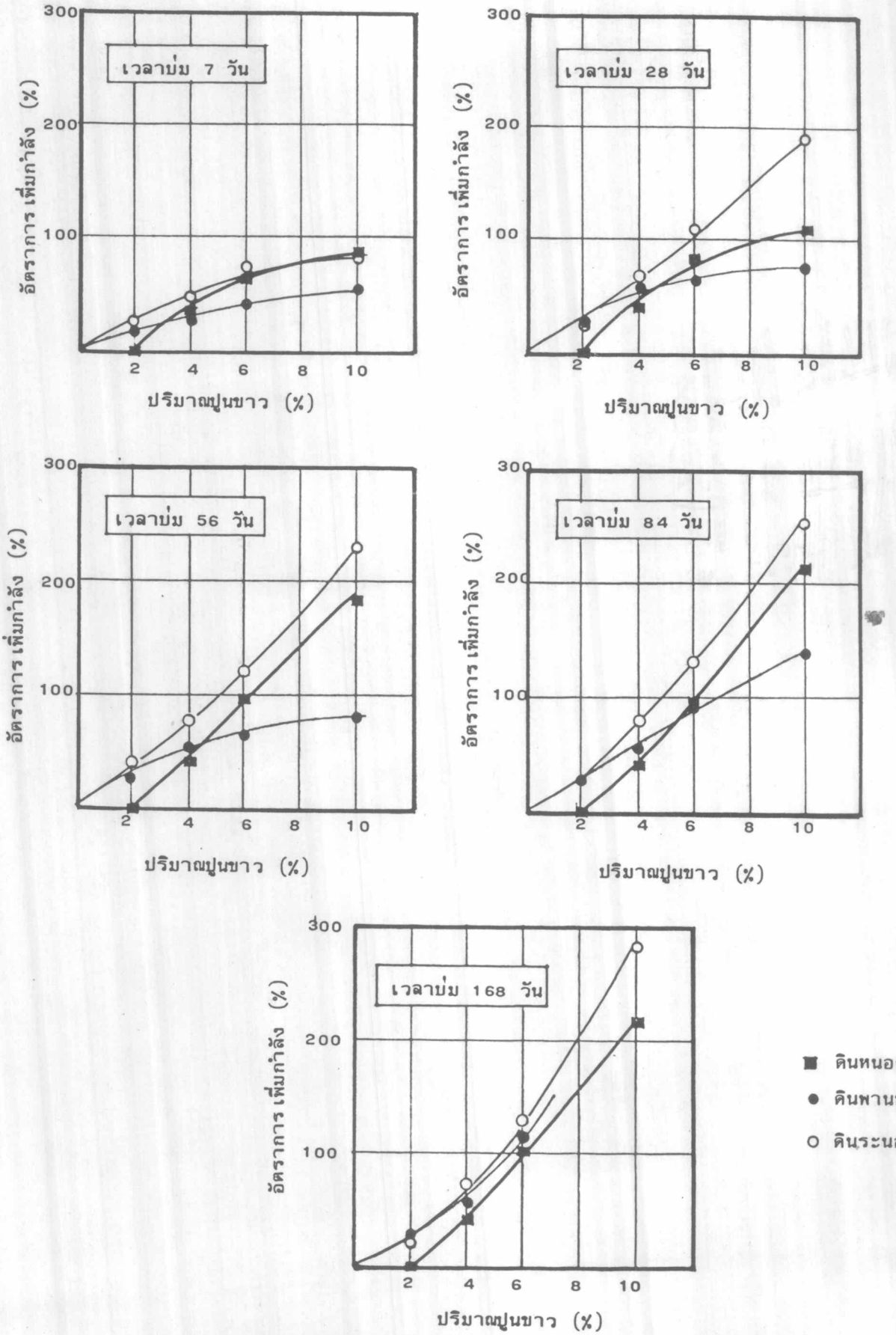
$$\frac{Qu(x) - Qu(0)}{Qu(0)} \times 100 \quad \text{. เปอร์เซ็นต์}$$

เมื่อ Qu(x) เป็นค่า unconfined compressive strength ของส่วนผสมปูนขาว x %

Qu(0) เป็นค่า unconfined compressive strength ของดินเหนียวตัวอย่าง

โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

ก. ส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดจะมีอัตราการเพิ่มกำลังสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม



รูปที่ 5.22 การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มกำลังในส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาวของดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3

ข. ส่วนผสมของดินระนองจะมีอัตราการเพิ่มกำลังสูงกว่าส่วนผสมของดินหนองงูเห่าและดินพานทองในระยะเวลาในการบ่มเดียวกัน

ค. อัตราการเพิ่มกำลังของดินพานทองเมื่อปริมาณปูนขาวน้อยกว่า 4 % จะมีอัตราสูงกว่าดินหนองงูเห่า แต่เมื่อปริมาณปูนขาวมากกว่า 4 % แล้วอัตราการเพิ่มกำลังของดินพานทองจะน้อยกว่าดินหนองงูเห่า ยกเว้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มประมาณมากกว่า 168 วัน ดินพานทองจะมีอัตราการเพิ่มกำลังสูงกว่าดินหนองงูเห่า

ง. มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มกำลังอย่างมากในดินเหนียวตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด โดยระยะเวลาที่มีการเปลี่ยนอัตราการเพิ่มกำลังของดินเหนียวตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว ส่วนหนึ่งที่แบ่งออกมาจากตัวอย่างที่ทดสอบหาค่า unconfined compressive strength โดยวิธี X-ray diffraction สามารถสรุปได้ว่าเป็นกำลังที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยา pozzolanic ระหว่างปูนขาวกับซิลิก้าและ/หรืออลูมิน่าที่สลายตัวออกมาจากแร่ดินเหนียวมาก three layer mineral (มอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์) ในช่วงระยะเวลานั้น ซึ่งสามารถประมาณเวลาที่กล่าวมาข้างต้นของดินแต่ละชนิดจากรูปที่ 5.22 ได้ดังนี้

- ดินหนองงูเห่าใช้ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 56 วัน
- ดินพานทองใช้ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 84 วัน
- ดินระนองใช้ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 28 วัน

จากผลการวิเคราะห์ดินเหนียวตัวอย่างในบทที่ 4 สามารถนำผลมาอธิบายการเปลี่ยนอัตราการเพิ่มกำลังอย่างมากของดินเหนียวตัวอย่างในระยะเวลาต่าง ๆ ของดินเหนียวตัวอย่างแต่ละชนิดดังนี้

- ดินระนองเกิดเร็วที่สุด เพราะจากผลการวิเคราะห์ส่วนของอนุภาคที่เล็กกว่า 0.002 มม. พบว่ามีปริมาณน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังมีแร่อิลไลท์เป็นส่วนประกอบเพียงเล็กน้อย จึงมีปูนขาวปริมาณพอเพียงที่จะทำให้อิลไลท์ส่วนนี้อิ่มตัวด้วย Ca^{2+} เร็วกว่าดินเหนียวตัวอย่างชนิดอื่น

- ดินหนองงูเห่ามีการเปลี่ยนแปลงนานกว่าดินระนอง เพราะดินหนองงูเห่ามีส่วนของอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. และส่วนของแร่ดินเหนียวพวก three layer mineral

มากกว่าดินระนอง จึงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่าดินระนอง

- ดินพานทองมีการเปลี่ยนแปลงช้าที่สุด ทั้งนี้เพราะดินพานทองมีปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียวใกล้เคียงกับดินหนองงูเห่า แต่ดินพานทองมีปริมาณของอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. มากกว่า จึงมีปริมาณแร่ดินเหนียวพวก three layer mineral ในส่วนประกอบของดินเหนียวมากกว่า ดังนั้น จึงใช้เวลาในการทำปฏิกริยากับปูนขาวมากกว่าดินหนองงูเห่าและดินระนอง

5.3.3 ผลของอุณหภูมิในการบ่ม

ในการศึกษาพฤติกรรมของส่วนผสมดินเหนียว-ปูนขาว เมื่อบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้กำหนดใช้ปริมาณปูนขาว 6 % และบ่มส่วนผสมที่อุณหภูมิ 34^{0} ซ. และ 60^{0}ซ. เป็นระยะเวลา 1 และ 3 วัน จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่า unconfined compressive strength ข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้สรุปไว้ในภาคผนวก ง. และแสดงความสัมพันธ์ของผลที่ได้ในรูปที่ 5.23 ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.3.3 ก. ดินหนองงูเห่า

จากรูปที่ 5.23 ก. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Qu กับอุณหภูมิในการบ่มที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 และ 3 วัน สามารถสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อพิจารณาผลของการพัฒนากำลังเนื่องจากอุณหภูมิการบ่มโดยเทียบจากกำลังของส่วนผสมที่อุณหภูมิห้อง (27^{0}ซ.) พบว่า

ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 วัน กำลังของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ 34^{0}ซ. และ 60^{0}ซ. มีค่าประมาณ 1.2 เท่าและ 1.9 เท่า ตามลำดับ

ที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน กำลังของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ 34^{0}ซ. และ 60^{0}ซ. มีค่าประมาณ 1.3 เท่าและ 3.1 เท่า ตามลำดับ

5.3.3 ข. ดินพานทอง

จากรูปที่ 5.23 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Qu กับอุณหภูมิในการบ่มที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 และ 3 วัน ของดินพานทอง สามารถสรุปผลได้เช่นเดียวกับ

ดินหนองงูเห่าคือเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อพิจารณาผลของการพัฒนากำลัง เนื่องจากอุณหภูมิในการบ่มโดยเทียบจากกำลังของส่วนผสมที่อุณหภูมิห้อง (27^{0}ซ.) พบว่า

ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 วัน กำลังของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ 34^{0}ซ. และ 60^{0}ซ. มีค่าประมาณ 1.1 เท่าและ 1.6 เท่า ตามลำดับ

ที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน กำลังของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ 34^{0}ซ. และ 60^{0}ซ. มีค่าประมาณ 1.2 เท่าและ 2.2 เท่า ตามลำดับ

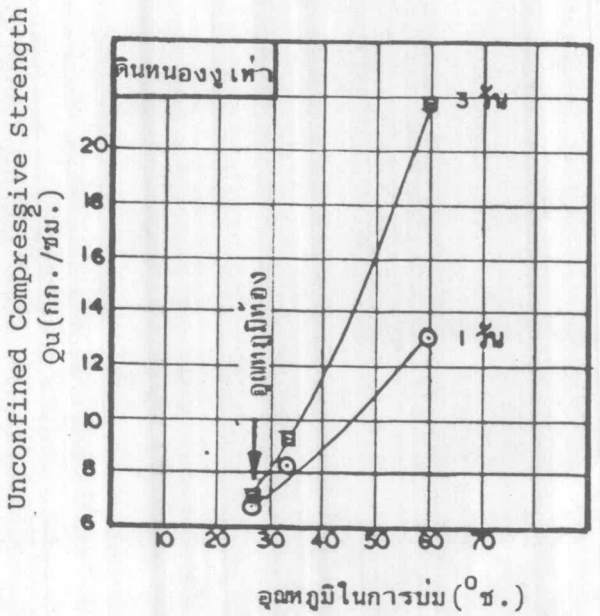
5.3.3 ค. ดินระนอง

จากรูปที่ 5.23 ค. แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Qu กับอุณหภูมิในการบ่มที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 และ 3 วัน สามารถสรุปผลได้เช่นเดียวกับดินหนองงูเห่าและดินพานทอง คือเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นกำลังของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อพิจารณาผลของการพัฒนากำลัง เนื่องจากอุณหภูมิในการบ่มโดยเทียบจากกำลังของส่วนผสมที่อุณหภูมิห้อง (27^{0}ซ.) พบว่า

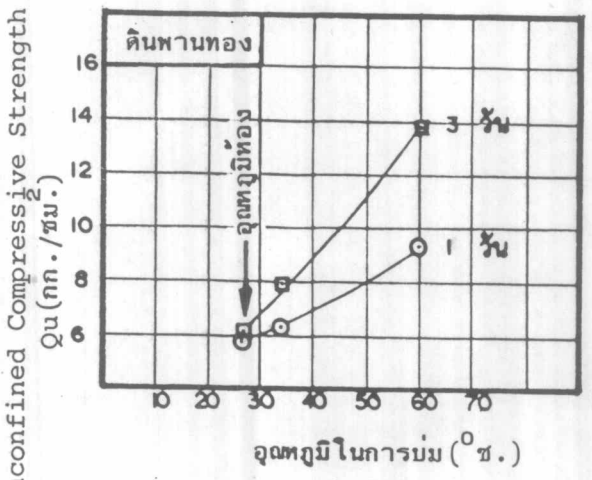
ที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 วัน กำลังของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ 34^{0}ซ. และ 60^{0}ซ. มีค่าประมาณ 1.3 เท่าและ 2.7 เท่า ตามลำดับ

ที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน กำลังของส่วนผสมเมื่อบ่มที่ 34^{0}ซ. และ 60^{0}ซ. มีค่าประมาณ 1.6 เท่าและ 3.3 เท่า ตามลำดับ

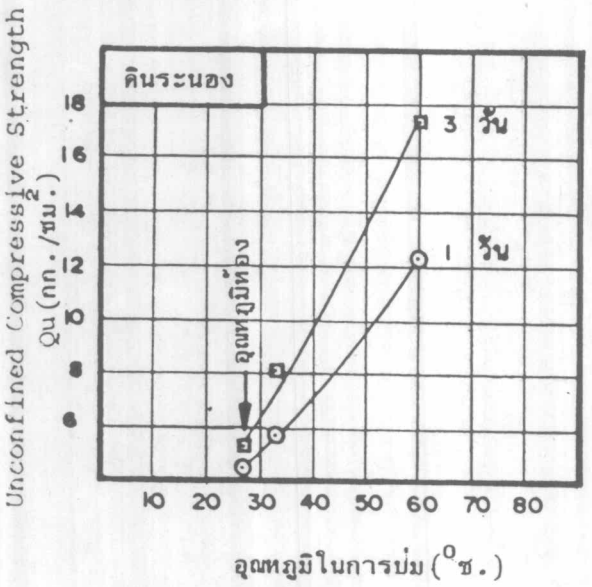
การที่เมื่ออุณหภูมิในการบ่มสูงขึ้นแล้วทำให้กำลังของส่วนผสมจากตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้นเป็นเพราะ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซิลิก้าและ/หรืออลูมิน่าจะเกิดการสลายตัวออกมาจากแร่ดินเหนียวและมาทำปฏิกิริยา pozzolanic กับ CaO ในปูนขาวได้มากขึ้น (Ruff และ Ho, 1966) ยังผลให้เกิดสารประกอบใหม่พวกแคลเซี่ยม ซิลิเกต และ/หรือ แคลเซี่ยมอลูมิเนต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวประสานมากขึ้นด้วย และจะมากขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ดังนั้น กำลังของส่วนผสมที่บ่มเป็นระยะเวลา 3 วัน จึงมีค่ามากกว่าตัวอย่างดินที่บ่มเป็นเวลา 1 วัน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Qu กับอุณหภูมิในการบ่มที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 และ 3 วัน ของดิน

ก. ดินหนองงูเห่า

ข. ดินพานทอง

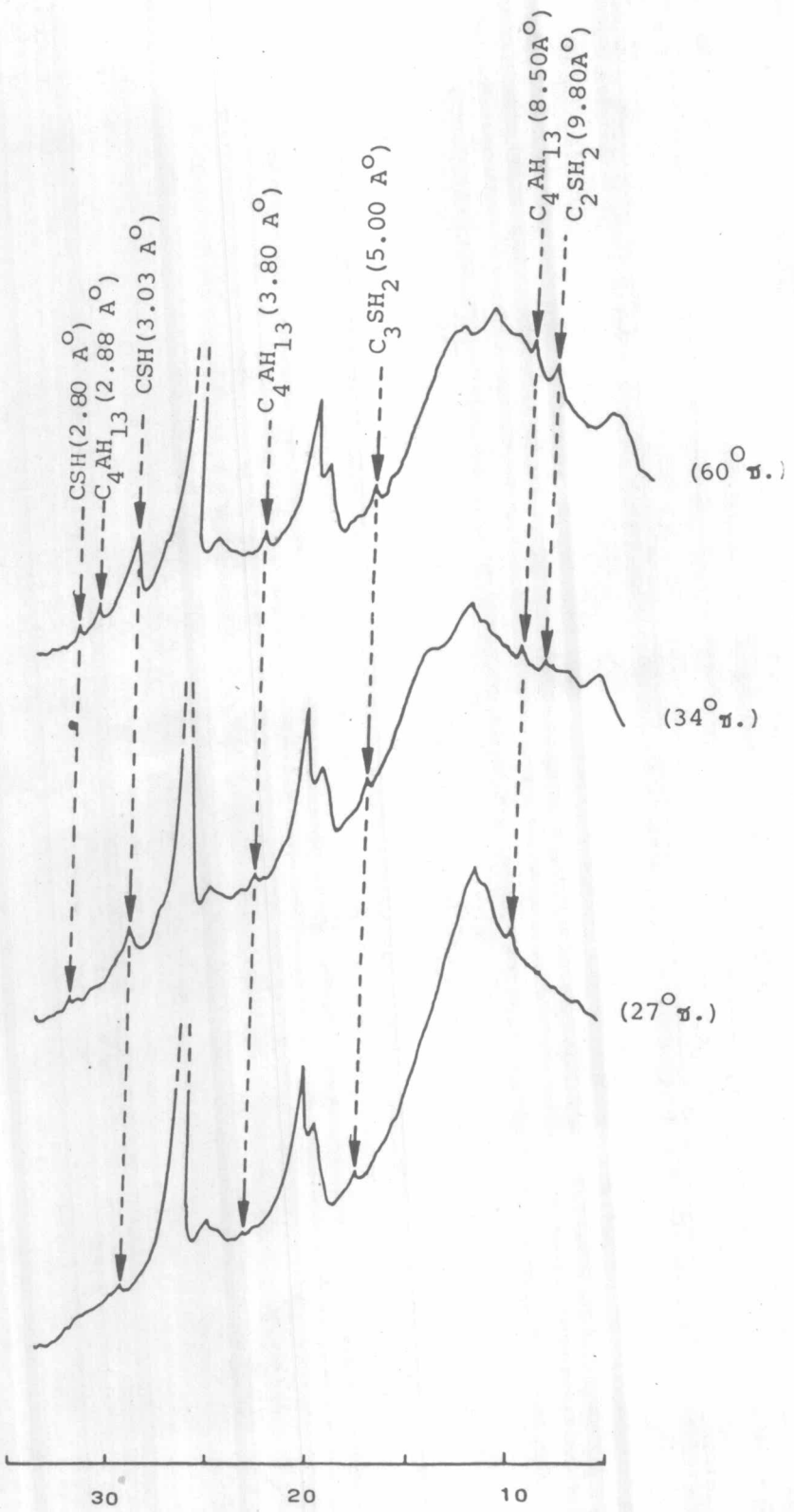
ค. ดินระนอง

รูปที่ 5.24 แสดง X-ray diffraction patern ของดินหนองงูเห่า เมื่อบ่มที่อุณหภูมิห้อง (27^{o}ซ) 34^{o}ซ. และ 60^{o}ซ. และบ่มเป็นระยะเวลา 3 วัน จากการพิจารณาผลในรูปที่ 5.24 เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการประกอบคำอธิบายการเพิ่มขึ้นของกำลัง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มมากขึ้น จะพบสารประกอบรูปแบบใหม่เกิดขึ้น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากการพบ peak ของสารประกอบใหม่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลจากการวิเคราะห์โดยวิธี X-ray diffraction ให้ผลสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า unconfined compressive strength ของตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มมากขึ้น

จากตัวอย่างดินทั้ง 3 ชนิดที่บ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังจะเป็นลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้คือ ดินระนอง ดินหนองงูเห่าและดินพานทอง

การที่ดินระนองเมื่อบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นแล้วจะมีการพัฒนากำลังดีกว่าดินหนองงูเห่าและดินพานทอง เนื่องมาจากดินระนองมีแร่คาโอลิไนท์เป็นส่วนประกอบหลักและมีอิลไลท์เพียงเล็กน้อย จึงมีปูนขาวที่จะทำปฏิกิริยา pozzolanic กับซิลิก้า และ/หรือ อลูมิน่ามากกว่าในส่วนผสมของดินอื่น ๆ กำลังจึงพัฒนาได้ดีกว่า จากการศึกษาผลงานในอดีตในบทที่ 2 และการวิเคราะห์คุณสมบัติของส่วนประกอบดินในบทที่ 4 จะพบว่า แร่ดินเหนียวหลักที่เป็นส่วนประกอบของดินเหนียวทั้ง 3 ชนิด คือ แร่มอนท์โมริลโลไนท์ แร่อิลไลท์ และแร่คาโอลิไนท์นั้น แร่มอนท์โมริลโลไนท์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ดังนั้น จึงสามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้ดีกว่าแร่ดินเหนียวอื่น รองลงมาคือ อิลไลท์และคาโอลิไนท์ตามลำดับ แต่ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดกำลังเพิ่มขึ้น (ปฏิกิริยา pozzloanic) ของแร่ดินเหนียวแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน คือ มอนท์โมริลโลไนท์และอิลไลท์จะเริ่มทำปฏิกิริยา pozzolanic เมื่ออนุภาคดินเหนียวอิ่มตัวด้วย Ca^{2+} ก่อน ดังนั้น จึงมีการใช้ CaO จากปูนขาวบางส่วนไปทำปฏิกิริยาโดยไม่ทำให้กำลังของส่วนผสมเพิ่มขึ้น แต่คาโอลิไนท์จะทำปฏิกิริยา pozzolanic ทันทีที่ผสมปูนขาวเข้าไป ดังนั้น ในตัวอย่างดินที่มีคาโอลิไนท์เป็นส่วนประกอบหลัก (เช่นดินระนอง) เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นกำลังของส่วนผสมจะสูงตามด้วย

ในดินหนองงูเห่าและดินพานทอง ถึงแม้ว่าเมื่อเทียบปริมาณของแร่คาโอลิไนท์ในส่วนผสมแล้วจะมีปริมาณมากกว่าดินระนองก็ตาม แต่แร่มอนท์โมริลโลไนท์และแร่อิลไลท์ ซึ่ง



รูปที่ 5.24 X-ray diffraction pattern ของส่วนผสมดินหนองงูเห่ากับปูนขาว 6 % ที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 วัน ซึ่งบ่มที่อุณหภูมิต่าง ๆ

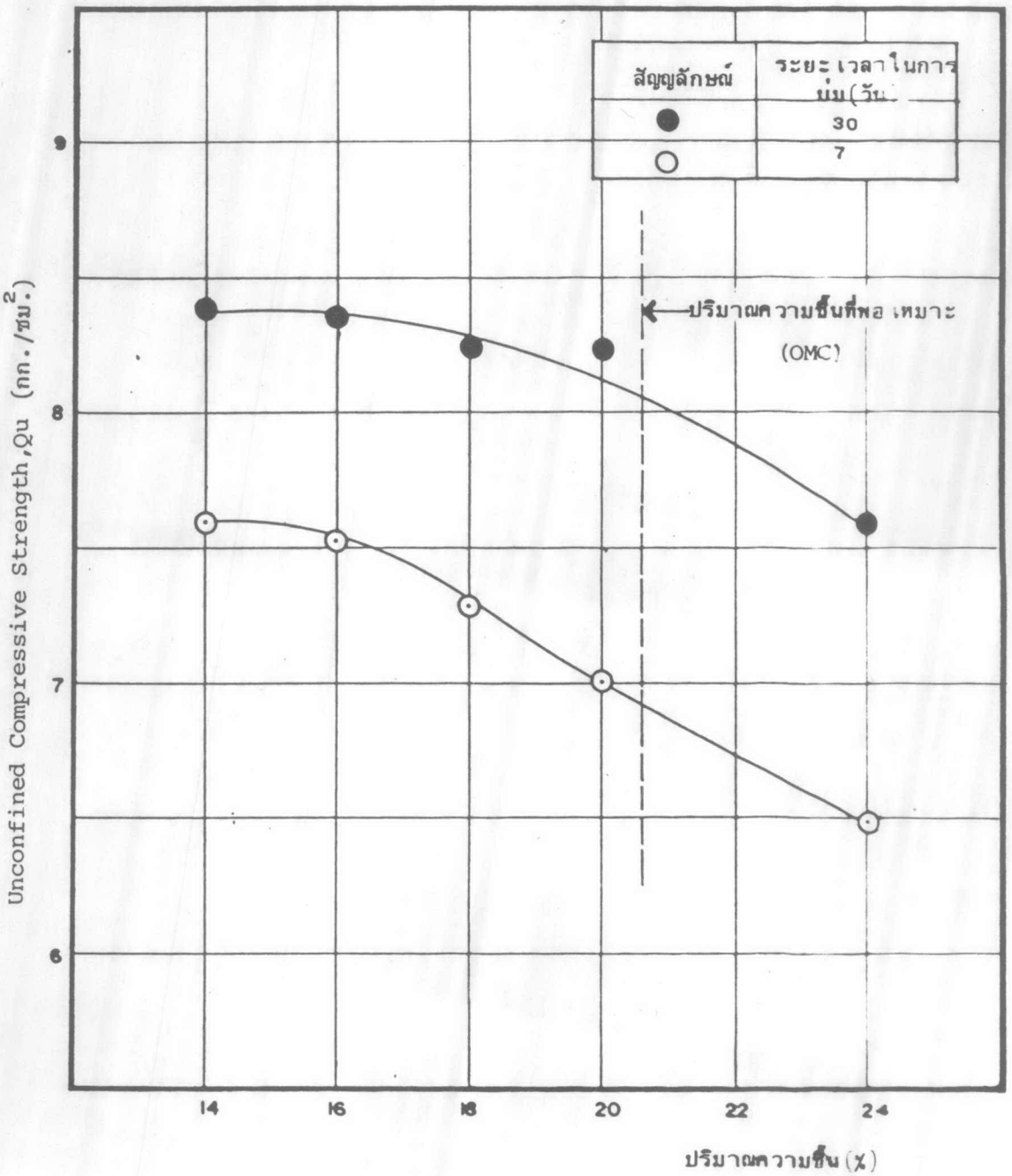
สามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวได้ดีกว่าจะใช้ปูนขาวไปส่วนหนึ่งโดยไม่ก่อให้เกิดกำลัง จึงเหลือปูนขาวไปทำปฏิกิริยา pozzolanic กับแร่คาโอลิไนท์ปริมาณน้อยลง กำลังของส่วนผสมดินเหนียวกับปูนขาว 6 % จึงน้อยกว่าส่วนผสมของดินระนอง

ส่วนการที่ดินหนองงูเห่าสามารถพัฒนากำลังได้ดีกว่าดินพานทอง เมื่อปริมาณปูนขาวเป็น 6 % เนื่องจากดินหนองงูเห่าและดินพานทองมีส่วนประกอบและสัดส่วนของปริมาณอนุภาคที่เล็กกว่า 0.002 มม. ใกล้เคียงกัน แต่ดินพานทองมีปริมาณอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มม. มากกว่า จึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณปูนขาวมากกว่าดินหนองงูเห่า เพื่อที่จะใช้ทำปฏิกิริยา pozzolanic ดังนั้น ส่วนผสมของดินพานทองกับปูนขาว 6 % จึงมีการพัฒนากำลังน้อยกว่าส่วนผสมของดินหนองงูเห่ากับปูนขาว 6 % แต่ถ้าเพิ่มปริมาณปูนขาวให้เพียงพอแล้วพอจะคาดคะเนได้ว่าลำดับในการพัฒนากำลังเมื่อผสมปูนขาวจากมากไปน้อยควรจะเป็นดินพานทอง ดินหนองงูเห่าและดินระนอง ตามลำดับ

5.3.4 ผลของปริมาณน้ำเริ่มแรกที่ใช้ผสม

การทดลองได้นำเอาดินพานทองและดินระนองผสมกับปูนขาว 6 % แล้วผสมน้ำให้มีความชื้นแตกต่างกัน เมื่อบ่มได้ระยะเวลา 7 วันและ 30 วัน จึงนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้มาทำการทดลองหาค่า unconfined compressive strength

จากรูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณความชื้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วันและ 30 วันของส่วนผสมของดินพานทองกับปูนขาว 6 % สามารถสรุปผลได้ว่า กำลังของส่วนผสมจะมีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น โดยด้านแห้งของปริมาณความชื้นที่พอเหมาะจะมีกำลังสูงกว่าด้านเปียก ทั้งนี้เพราะค่าความเข้มข้นของอิออนของน้ำในช่องว่างมวลดินจะมีค่าสูงขึ้นตามความชื้นที่ลดลง ดังนั้น Ca^{2+} จึงถูกดูดซึมโดยอนุภาคดินเหนียวพวก three layer mineral ซึ่งเป็นดินเหนียวที่เป็นส่วนประกอบหลักในดินพานทองได้สูงขึ้นจนอาจที่จะมีบางส่วนอิ่มตัวด้วย Ca^{2+} และสลายตัวมาเป็น ซิลิก้า และ/หรือ อลูมิน่า มาทำปฏิกิริยา pozzolanic ได้มากขึ้น กำลังจึงมีค่าสูง แต่เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของอิออนก็ลดน้อยลงไปทำให้ Ca^{2+} ที่จะถูกดูดซึมโดยแร่ดินเหนียวลดน้อยลง ซึ่งอาจทำให้ปริมาณของแร่ดินเหนียวพวก three layer mineral ที่อิ่มตัวด้วย Ca^{2+} ลดน้อยลงหรือไม่อิ่มตัวเลยเมื่อใช้ปูนขาวปริมาณ 6 % นี้ ดังนั้น ซิลิก้า และ/หรือ อลูมิน่า ที่สลายตัว



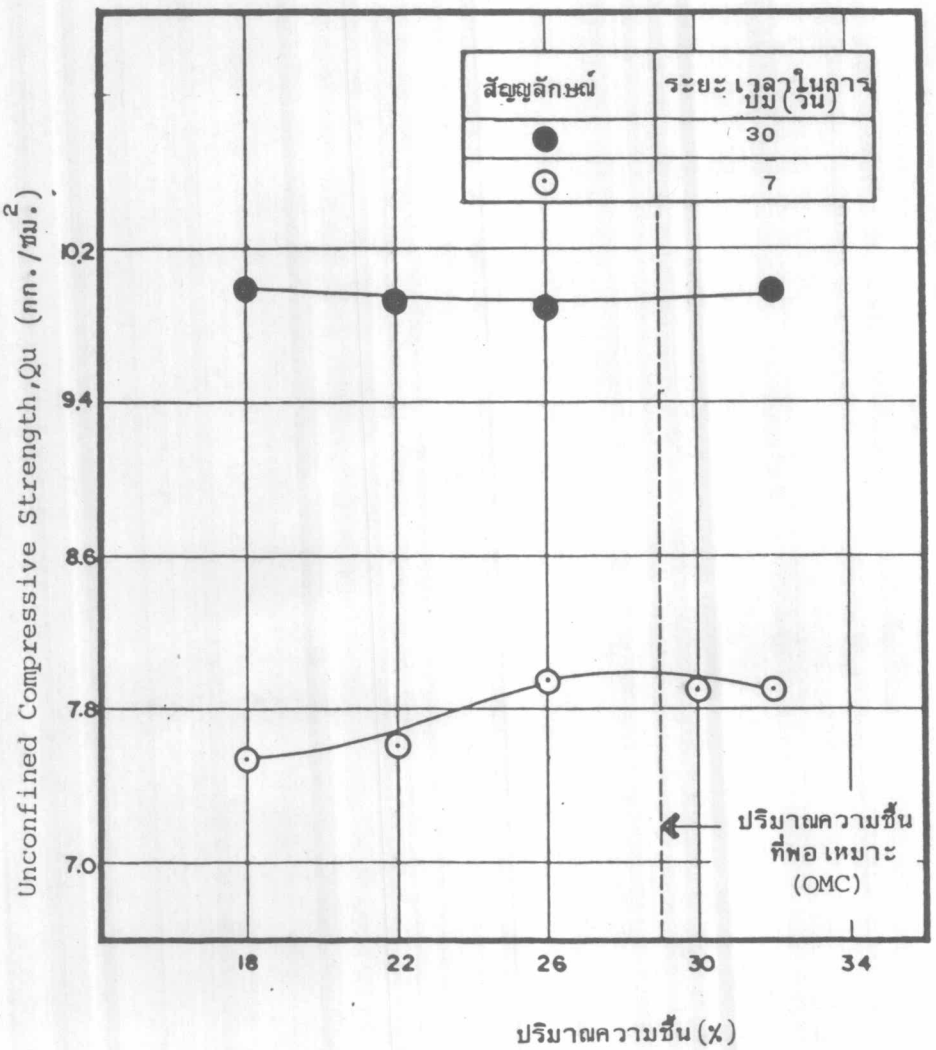
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณความชื้น ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7วัน และ 30วัน ของส่วนผสมดินพานทองกับปูนขาว 6%

ออกมาทำปฏิกิริยา pozzolanic กับปูนขาวจึงลดลง กำลังจึงลดลงตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น

เมื่อระยะเวลาในการบ่ม 30 วัน ค่า Qu จะสูงขึ้นจากตัวอย่างที่ใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน ทุก ๆ ปริมาณความชื้นที่ได้ทำการทดลอง ทั้งนี้เพราะเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นนั้น ปฏิกิริยา pozzolanic จะเกิดมากขึ้นด้วย ดังนั้น ค่า Qu ของ 30 วันจึงสูงกว่าค่า Qu ของ 7 วัน ที่ปริมาณความชื้นเดียวกัน

จากรูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณความชื้นที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 วันและ 30 วันของส่วนผสมดินระนองกับปูนขาว 6 % สามารถสรุปผลได้ว่า ค่า Qu จะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณความชื้นจนถึงปริมาณความชื้นหนึ่ง (มีค่าใกล้ปริมาณความชื้นที่พอเหมาะ) ค่า Qu ก็มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากดินระนองประกอบด้วยแร่ดินเหนียวหลัก คือ คาโอลิไนท์เป็นส่วนใหญ่และมีอิลไลท์เพียงปริมาณเล็กน้อย จากผลงานในอดีตนั้นพบว่า แร่คาโอลิไนท์จะเกิดปฏิกิริยา cation exchance อย่างรวดเร็ว ซึ่งปฏิกิริยานี้ไม่มีผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังของดินระนอง ส่วนปฏิกิริยา pozzolanic ซึ่งก่อให้เกิดการพัฒนากำลังนั้นจะค่อย ๆ เกิดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความชื้นอันเป็นผลให้ค่าความเข้มข้นของอิออนเปลี่ยนแปลงไปจึงไม่ค่อยมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาที่จะพัฒนากำลังของคาโอลิไนท์ ดังจะเห็นได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่า Qu เพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อระยะเวลาในการบ่มเป็น 30 วัน ค่า Qu จะเพิ่มสูงจากตัวอย่างที่บ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน ทั้งนี้เหตุผลในการอธิบายเหมือนในส่วนผสมของดินพานทองดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Qu กับปริมาณความชื้น ที่ระยะ เวลาในการบ่ม 7วัน และ 30วัน ของส่วนผสมดินระนองกับปูนขาว 6%