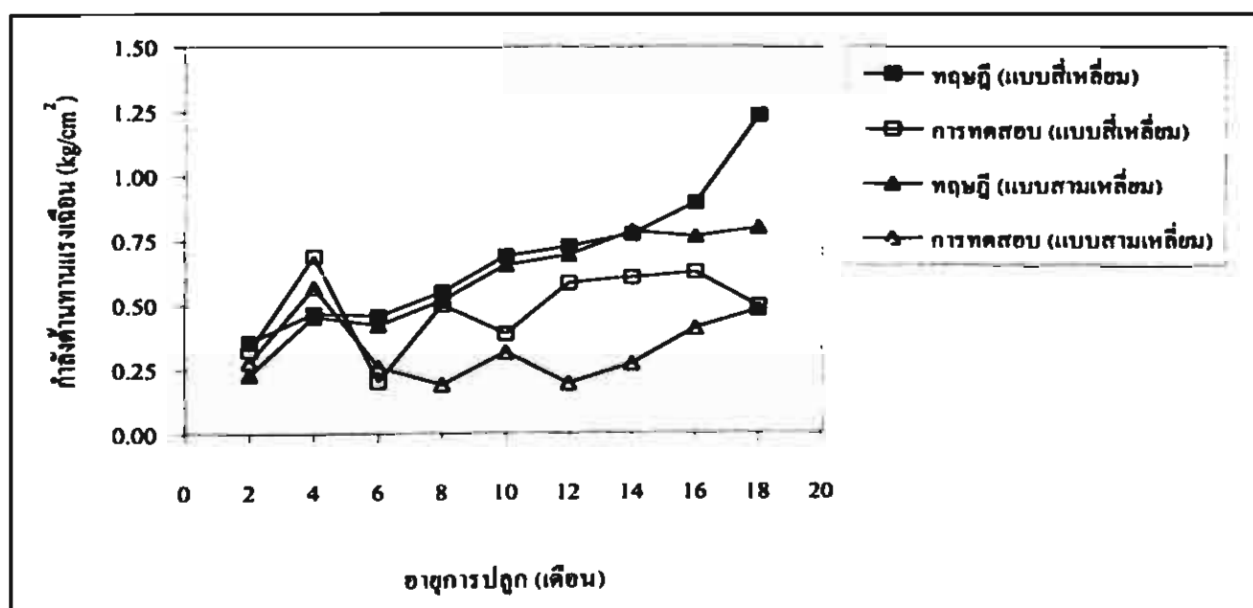


กำลังต้านทานการเหือนของกลางด้านกระดินเทพาจะใกล้เคียงกับ ระหว่างต้นกระดินเทพา เนื่องจากอิทธิพลของรากกระดินเทพายังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเหือนที่ได้จะเป็นในส่วนของหญ้าแฝกเป็นส่วนใหญ่ แต่ในเดือนที่ 4 กำลังต้านทานการเหือนจะสูงมากอาจจะเป็นเพราะหลุมทดสอบมีก้อนลูกรังทำให้กำลังต้านทานการเหือนสูงมาก แต่เมื่ออายุการปลูกที่มากกว่า 8 เดือนรากกระดินเทพาเริ่มเข้ามามีอิทธิพล ทำให้ระบบรากพืชแบบผสมผสานสมบูรณ์แบบส่งผลให้กำลังต้านทานการเหือนที่กลางต้นกระดินเทพามีค่าสูงขึ้น ส่วนกำลังต้านทานการเหือนระหว่างแถวจะมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับระหว่างต้นกระดินเทพาและกลางต้นกระดินเทพา แต่เมื่อเทียบกับดินเปล่าจะมีค่ามากกว่าดินเปล่า



ภาพที่ 4-20 กำลังต้านทานการเหือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และ แบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 2

จากภาพที่ 4-20 กำลังต้านทานการเหือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และ แบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 2 ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังต้านทานการเหือนของทฤษฎีมีค่าดังนี้ 0.355, 0.466, 0.455, 0.550, 0.689, 0.727, 0.773, 0.896 และ 1.236 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

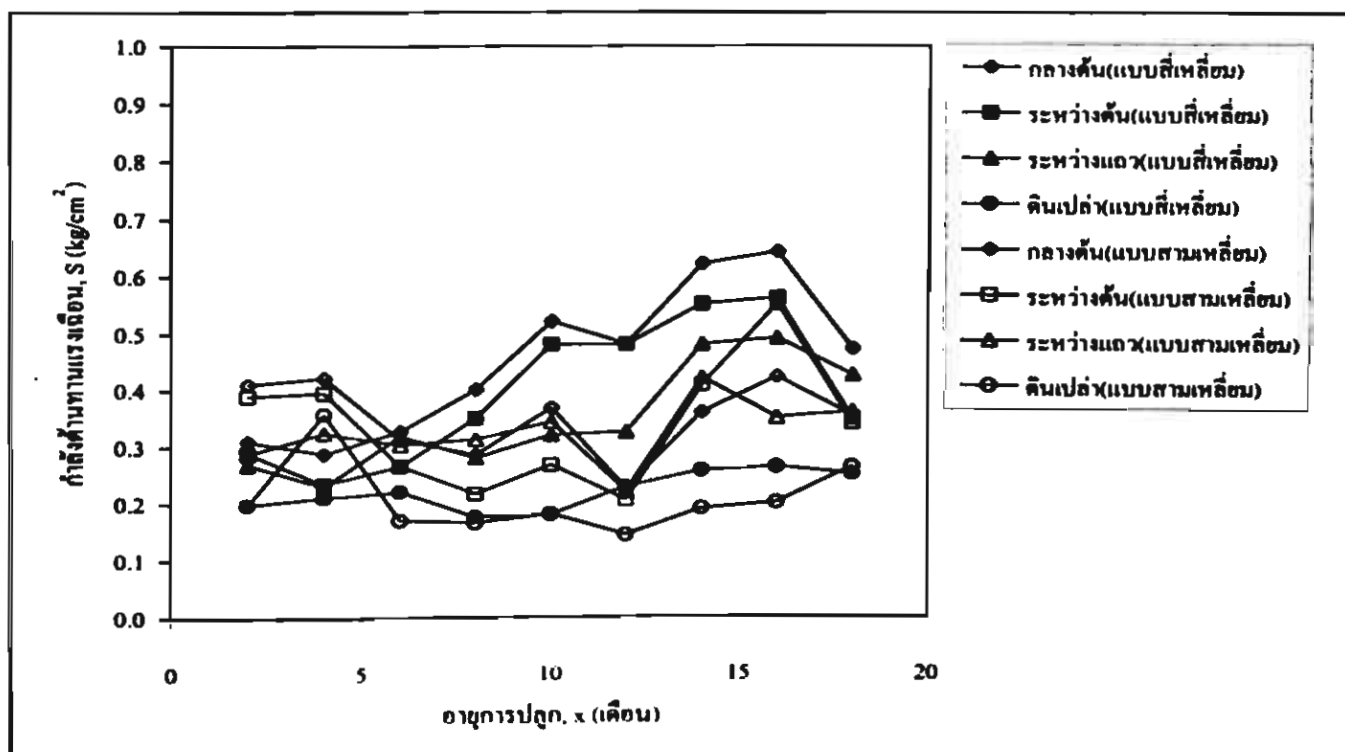
กำลังต้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามมีค่าดังนี้ 0.321, 0.689, 0.201, 0.500, 0.387, 0.583, 0.607, 0.627 และ 0.494 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังต้านทานการเฉือนของทฤษฎีมีค่าดังนี้ 0.227, 0.454, 0.420, 0.517, 0.656, 0.693, 0.785, 0.765 และ 0.799 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามมีค่าดังนี้ 0.277, 0.568, 0.259, 0.190, 0.315, 0.193, 0.269, 0.407 และ 0.480 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นกำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามซึ่งเป็นค่าไม่สูงมากถ้าเปรียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งอาจจะมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินมีผลต่อกำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนาม แต่ในทางทฤษฎีไม่นำเอาปริมาณความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วย ที่อายุการปลูกเดียวกัน ค่ากำลังต้านทานการเฉือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้พบว่ารากพืชสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนได้มากเลยทีเดียว



ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างดินเปล่า ดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 3 กับอายุการปลูกในสนาม

จากภาพที่ 4-21 พบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า

รูปแบบที่ 3 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น

กำลังความต้านทานแรงเฉือนของกลางต้นกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.410 ถึง 0.653 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.290 ถึง 0.274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.270 ถึง 0.289 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.175 ถึง 0.263 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.226 ถึง 0.421 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.205 ถึง 0.550 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.221 ถึง 0.360 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

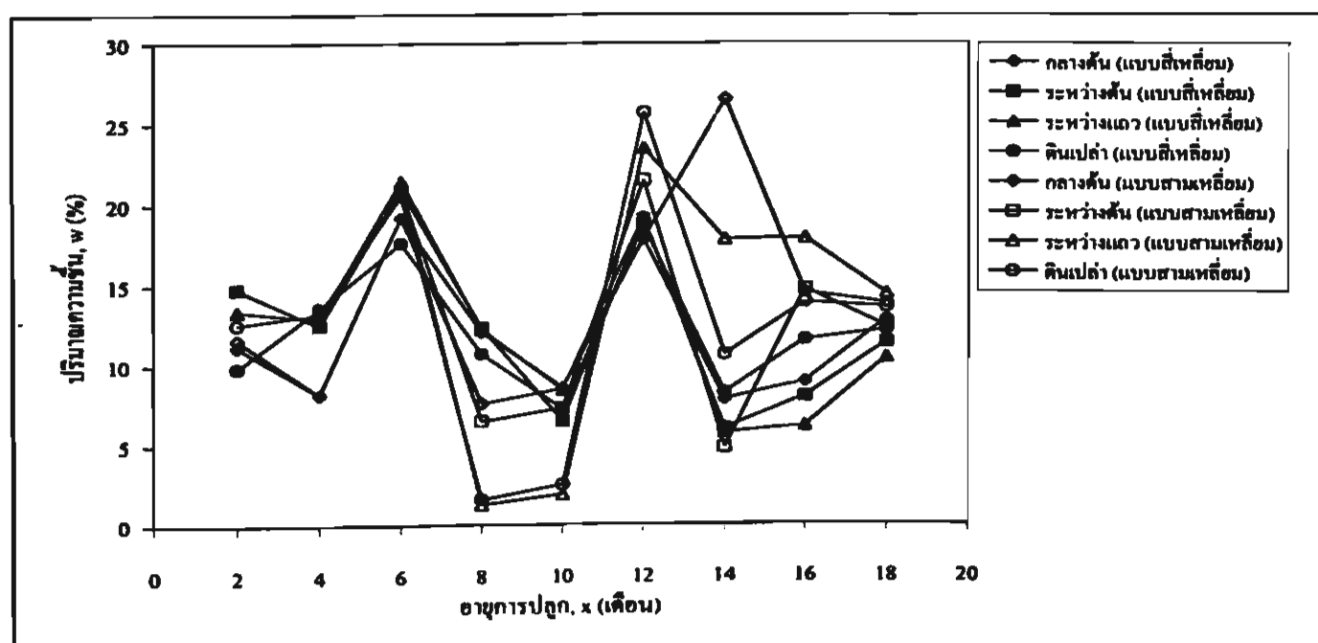
กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.143 ถึง 0.357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นการทดสอบกำลังด้านการเฉือนทั้ง 3 แบบและดินเปล่าในรูปแบบการปลูกที่ 3 พบว่ากำลังด้านการเฉือนกลางต้นกระถินเทพามีค่ามากกว่าหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา, หญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา และดินเปล่า เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน ในช่วง 6 เดือนแรกกำลังต้านทานการเฉือนของกลางต้นกระถินเทพาจะใกล้เคียงกับ ระหว่างต้นกระถินเทพา เนื่องจากอิทธิพลของรากกระถินเทพายังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นในส่วนของหญ้าแฝกเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่ออายุการปลูกที่มากกว่า 8 เดือนรากกระถินเทพาเริ่มเข้ามามีอิทธิพล ทำให้ระบบรากพืชแบบผสมผสานสมบูรณ์แบบส่งผลให้กำลังต้านทานการเฉือนที่กลางต้นกระถินเทพามีค่าสูงขึ้น ส่วนกำลังต้านทานการเฉือนระหว่างแถวจะมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบ

กำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามมีค่าดังนี้ 0.362, 0.380, 0.294, 0.272, 0.326, 0.218, 0.396, 0.440 และ 0.351 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นกำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามซึ่งเป็นค่าไม่สูงมากถ้าเปรียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งอาจจะมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินมีผลต่อกำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนาม แต่ในทางทฤษฎีไม่นำเอาปริมาณความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วย ที่อายุการปลูกเดียวกัน ค่ากำลังด้านทานการเหือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้พบว่ารากพืชสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเหือนได้มากเลยทีเดียว

เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน พบว่า ส่วนมากค่ากำลังด้านทานการเหือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยมของทั้งสามรูปแบบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารากพืชมีบทบาทในการเสริมแรงให้กับดินได้มากพอสมควรตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของดินเปล่า ดินที่เสริมรากกระดินเทพา และหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 1 กับอายุการปลูกในสนาม

จากภาพที่ 4-23 พบว่า ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากกระดินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางดิน ระหว่างดิน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูป

แบบที่ 1 มีค่าแปรเปลี่ยนตามธรรมชาติตามฤดูกาล ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.80 ถึง 19.21 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.98 ถึง 20.93 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.71 ถึง 21.47 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.24 ถึง 18.63 เปอร์เซ็นต์

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.60 ถึง 26.50 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.80 ถึง 21.50 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 1.30 ถึง 23.50 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 1.60 ถึง 25.70 เปอร์เซ็นต์

จากภาพที่ 4-24 พบว่า ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 2 มีค่าแปรเปลี่ยนตามธรรมชาติตามฤดูกาล ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้

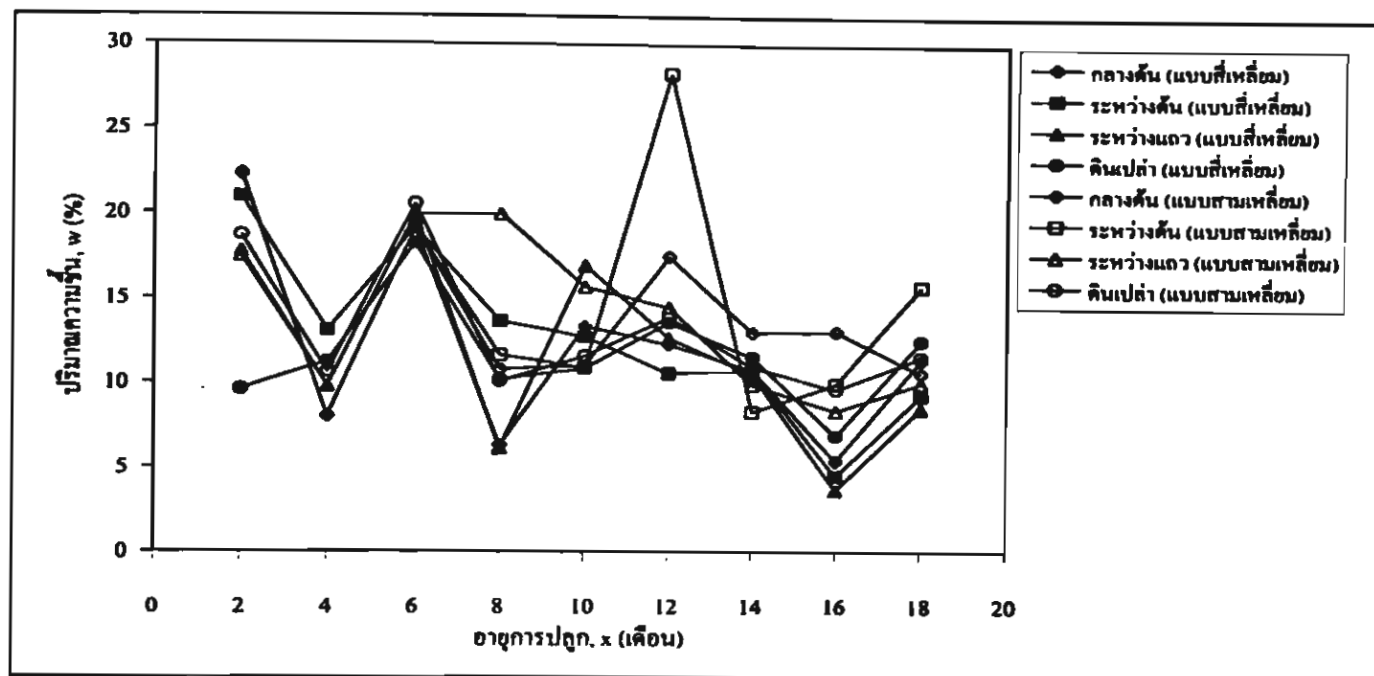
การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.39 ถึง 22.23 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.48 ถึง 20.92 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.67 ถึง 19.96 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.89 ถึง 18.21 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของดินเปล่า ดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบที่เหี่ยยม และแบบสามเหี่ยยม รูปแบบที่ 2 กับอายุการปลูกในสนาม

การปลูกแบบสามเหี่ยยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางดินกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.00 ถึง 22.30 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.30 ถึง 28.30 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.37 ถึง 19.96 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 9.63 ถึง 20.55 เปอร์เซ็นต์

จากภาพที่ 4-25 พบว่า ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบที่เหี่ยยม และแบบสามเหี่ยยม ทดสอบที่กลางดิน ระหว่างดิน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 3 มีค่าแปรเปลี่ยนตามธรรมชาติตามฤดูกาลไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบที่เหี่ยยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางดินกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.54 ถึง 19.54 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.14 ถึง 17.36 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.29 ถึง 17.96 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.43 ถึง 16.53 เปอร์เซ็นต์

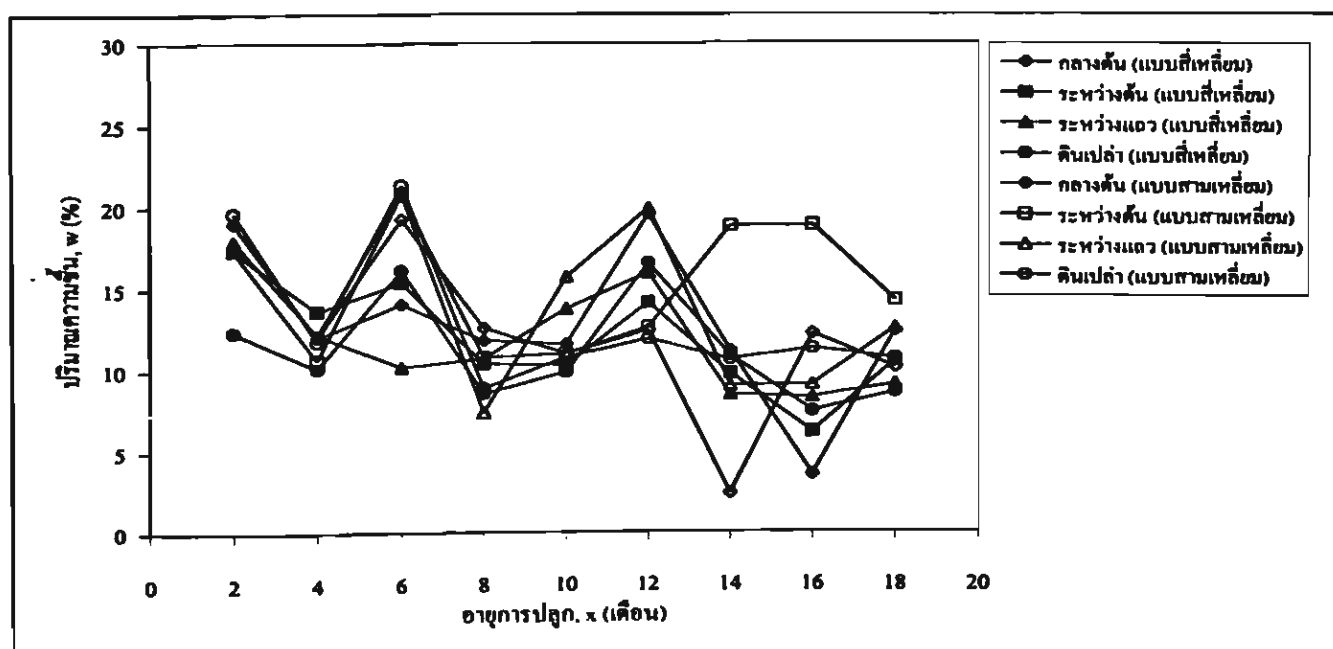
การปลูกแบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางต้นกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.40 ถึง 19.27 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.63 ถึง 20.79 เปอร์เซ็นต์

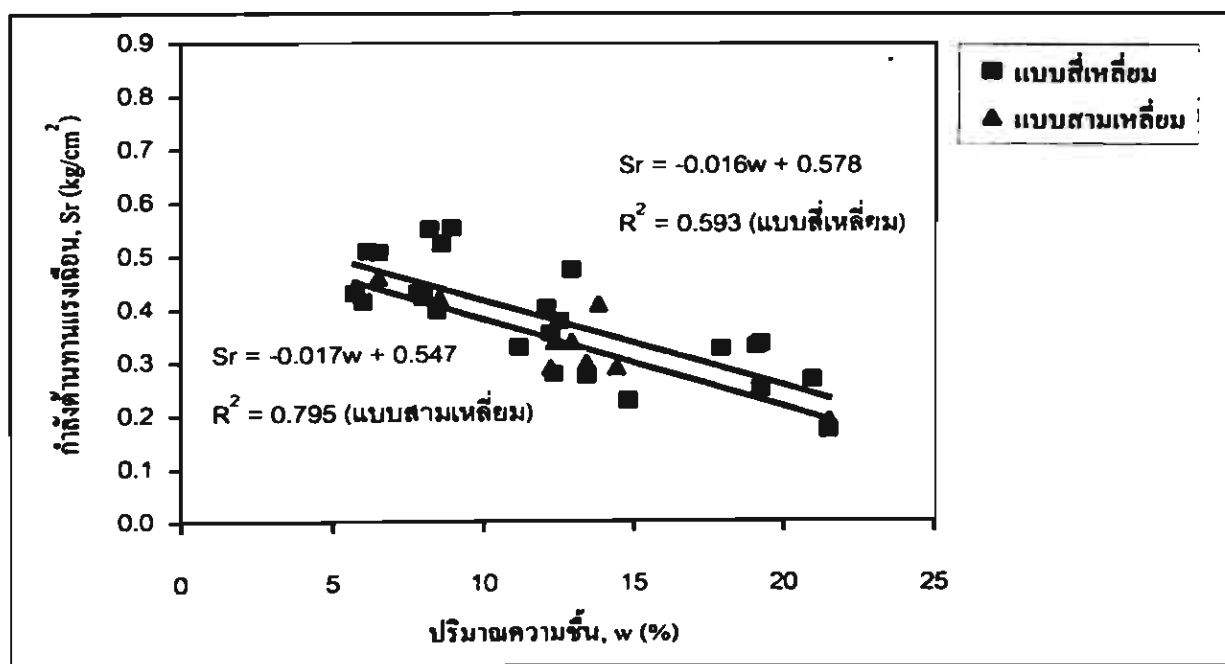
ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.40 ถึง 20.79 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.90 ถึง 21.33 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของดินเปล่า ดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 3 กับอายุการปลูกในสนาม

ดังนั้น ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินอาจจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเจริญเติบโตของต้น กระถินเทพาและหญ้าแฝกเมื่อพิจารณาในความชื้นที่ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาในความชื้นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งจะแปรปรวนตามฤดูที่แตกต่างกันทำให้กำลังต้านทานการเฉือนไม่มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการปลูกเนื่องจากปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน อย่างเช่นในช่วงอายุ 4 เดือน ค่าความต้านทานแรงเฉือนจะสูงขึ้นซึ่งเป็นผลเนื่องจาก ปริมาณความชื้นที่มีแนวโน้มต่ำและในหลุมทดสอบมีลูกรั้ง และจะลดลงอีกครั้งในเดือนที่ 6 เนื่องจากปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะลดลงอีกครั้งในเดือนที่ 10 เนื่องจากปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน ดังภาพต่อไปนี้

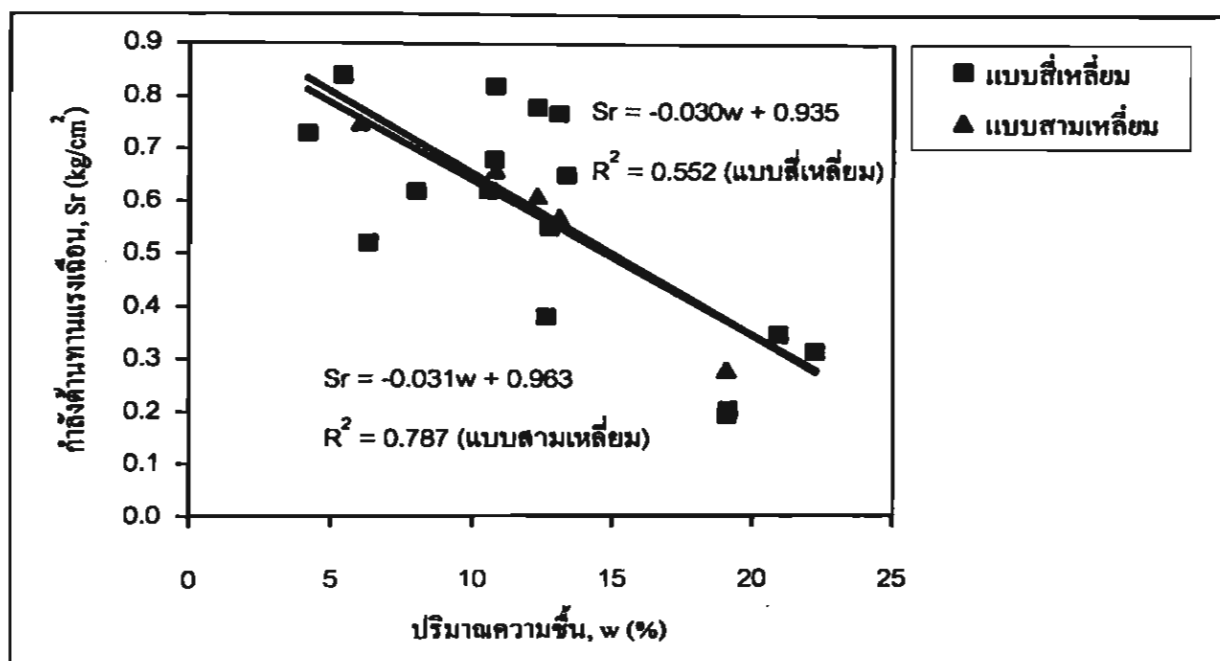


ภาพที่ 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในมวลดินกำลังต้านทานแรงเฉือนกรณีที่แตกต่างกันของการปลูก ในรูปแบบที่ 1

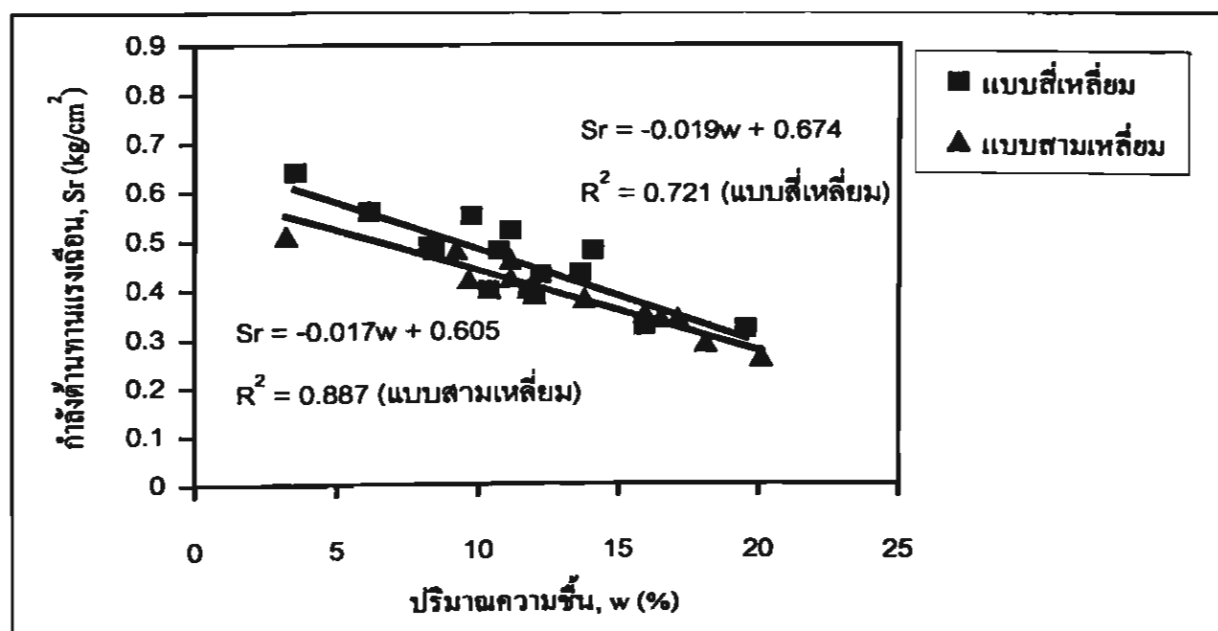
จากภาพที่ 4-26 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยของรูปแบบที่ 1 ทั้งแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกมาในรูปสมการดังนี้ คือ $Sr = -0.016w + 0.578$ ($R^2 = 0.593$) และ $Sr = -0.017w + 0.547$ ($R^2 = 0.795$) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-27 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยของรูปแบบที่ 2 ทั้งแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกมาในรูปสมการดังนี้ คือ $Sr = -0.030w + 0.935$ ($R^2 = 0.552$) และ $Sr = -0.031w + 0.963$

($R^2 = 0.787$) ตามลำดับ

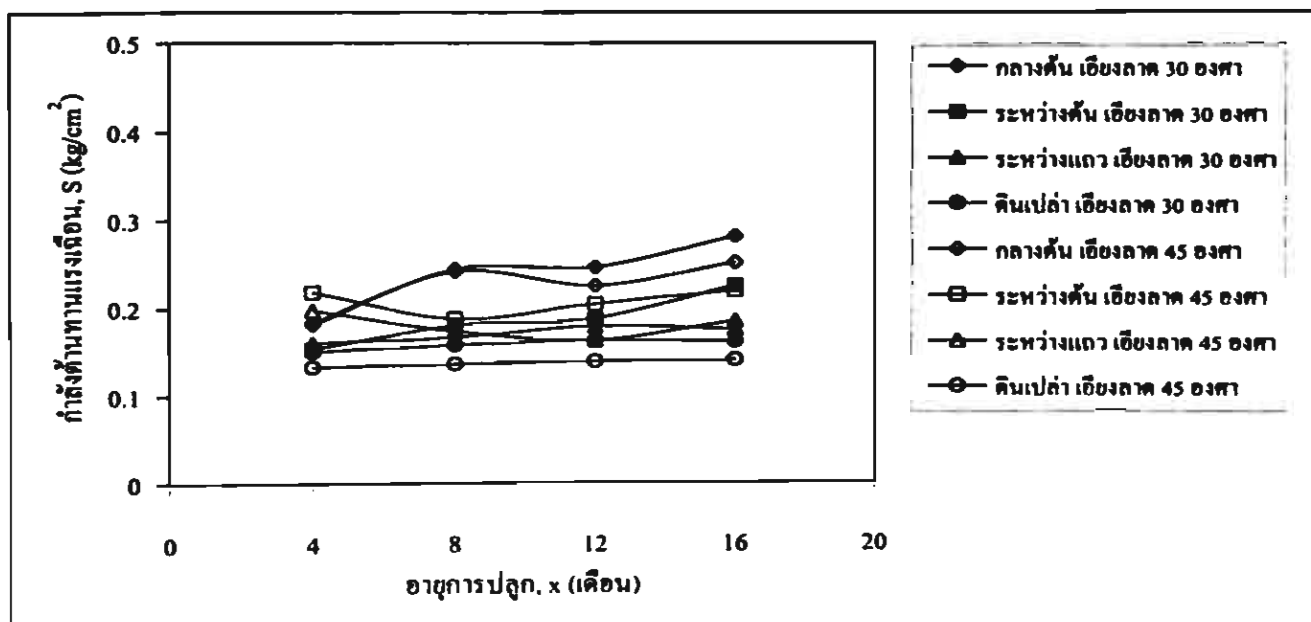


ภาพที่ 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในมวลดินกำลังด้านทานแรงเฉือนกรณีที่แตกต่างกันของการปลูก ในรูปแบบที่ 2

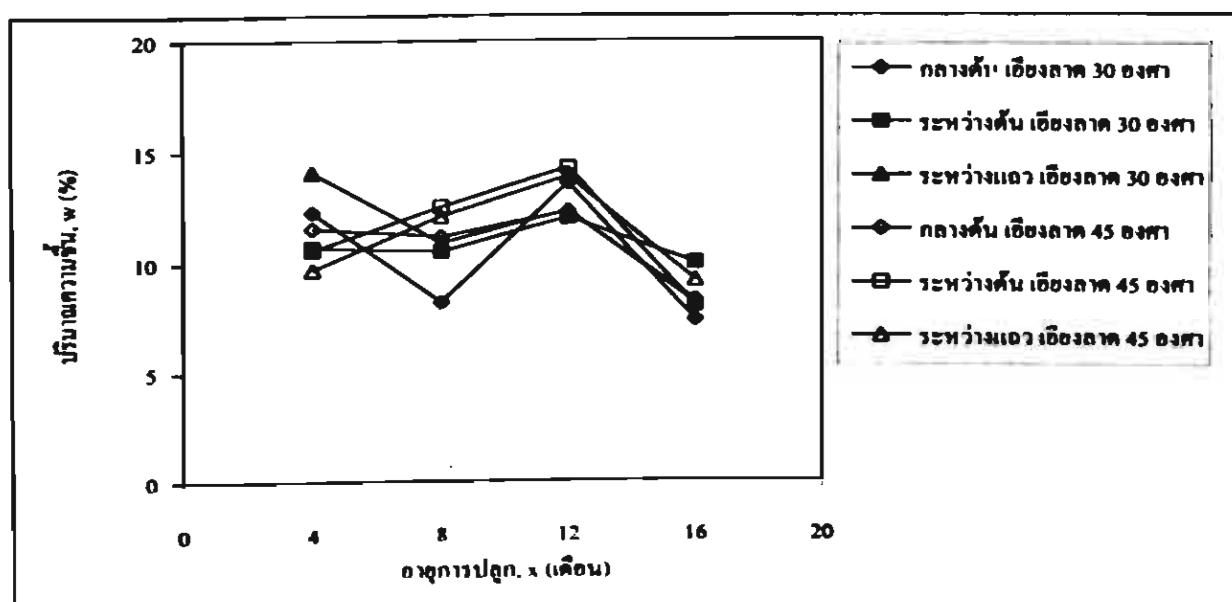


ภาพที่ 4-28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในมวลดินกำลังด้านทานแรงเฉือนกรณีที่แตกต่างกันของการปลูก ในรูปแบบที่ 3

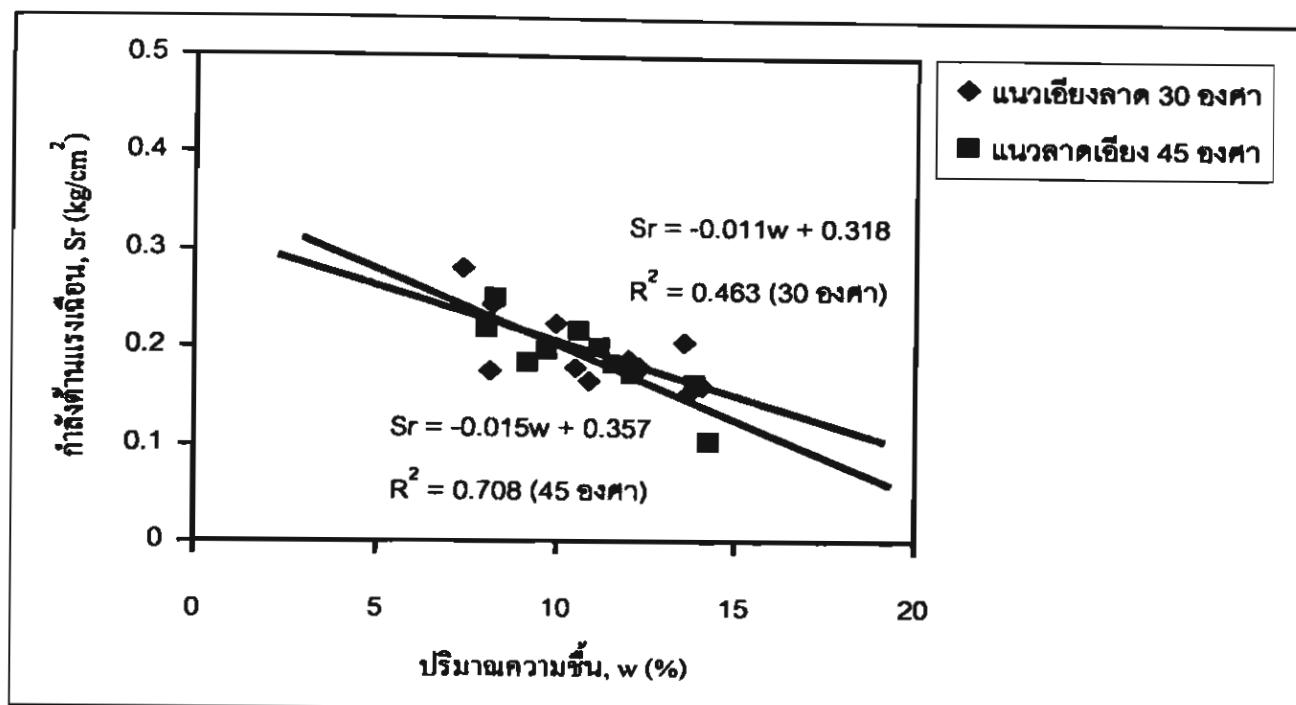
จากภาพที่ 4-28 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยของรูปแบบที่ 3 ทั้งแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกมาในรูปสมการดังนี้ คือ $S_r = -0.019w + 0.674$ ($R^2 = 0.721$) และ $S_r = -0.017w + 0.605$ ($R^2 = 0.887$) ตามลำดับ



ภาพที่ 4-29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่ปลูกในแนวเอียงลาด กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่ปลูกในแนวเอียงลาด กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือน กับความชื้นในมวลดินกรณีที่แตกต่างกัน ความลาดชันของการปลูก 30 องศา และ 45 องศา

จากภาพที่ 4-29, 4-30 และ 4-31 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่ปลูกในแนวเอียงลาด 30 และ 45 องศา กับอายุการปลูกในสนามที่อายุ 4, 8, 12 และ 16 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

แนวเอียงลาด 30 องศา

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของกลางต้นกระถินเทพา ความต้านทานแรงเฉือนของกลางต้นกระถินเทพาคิด เป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น 0.097 , 0.227 และ 0.370 ตามลำดับ โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.183 ถึง 0.251 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็น 1.370 เท่า

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่างกระถินเทพา คิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น 0.141 , 0.063 และ -0.005 ตามลำดับ โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.187 ถึง 0.2188 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็น 1.170 เท่า

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่างแถว คิด เป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น -0.122, -0.174 และ -0.164 ตามลำดับ โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.163 ถึง 0.197 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็น 1.200 เท่า

แนวเอียงลาด 45 องศา

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกของกลางคันกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกน้อยมาก ความต้านทานแรงเฉือนของกลางคันกระถินเทพาคิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น 0.346, 0.358 และ 0.550 ตามลำดับ โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.181 ถึง 0.281 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็น 1.550 เท่า

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่างกระถินเทพาคิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น 0.170, 0.225 และ 0.466 ตามลำดับ โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.153 ถึง 0.225 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็น 1.460 เท่า

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่างแถวคิดเป็นอัตราส่วนการเพิ่มขึ้น 0.036, 0.114 และ 0.094 ตามลำดับ โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.160 ถึง 0.178 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คิดเป็น 1.114 เท่า

ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อย และได้สมการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นกำลังต้านทานการเฉือนของดินที่ความลาดชันของการปลูก 30 องศา และ 45 องศา คือ $S_r = -0.011w + 0.318$ ($R^2 = 0.463$) และ $S_r = -0.015w + 0.357$ ($R^2 = 0.708$) ตามลำดับ

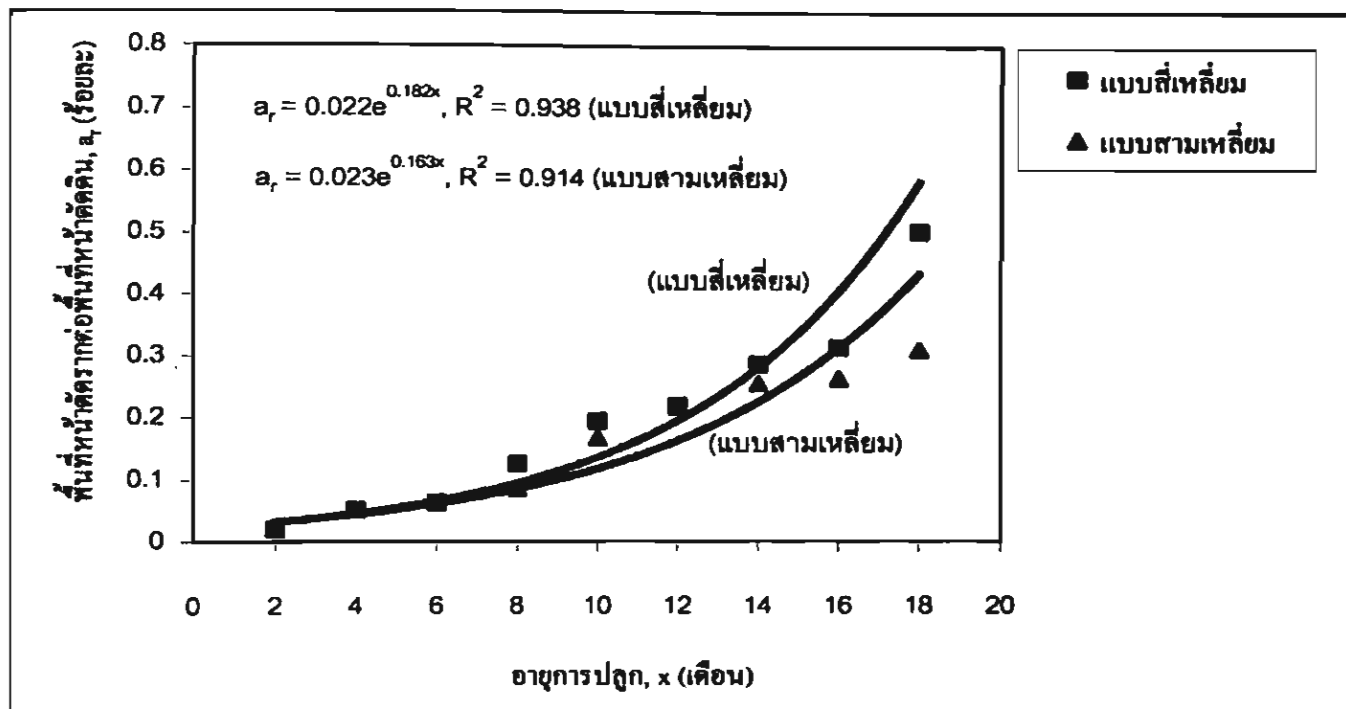
ดังนั้นจากการทดสอบการต้านทานการเฉือนของดินในสนาม ความลาดชันของการปลูก 30 องศา และ 45 องศา ลักษณะดินเป็นดินลูกรังเม็ดเล็กการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่าต่ำกว่าทำให้การต้านทานการเฉือนของดินมีค่าลดลงปริมาณความชื้นในดินมีผลกระทบต่อความต้านทานการเฉือนน้อยมาก

จากภาพที่ 4-32, 4-33 และ 4-34 พบว่าพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม มีค่าเพิ่มขึ้นที่อายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น และแต่ละรูปแบบมีค่าพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

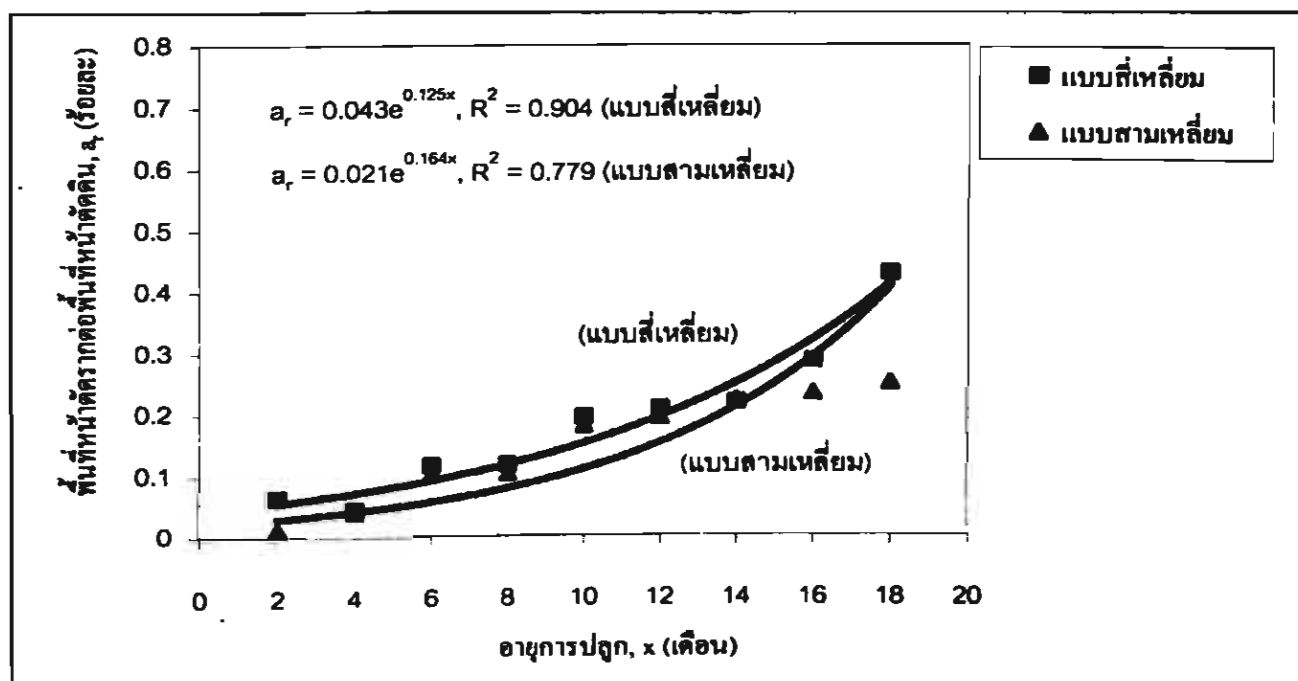
รูปแบบการปลูกที่ 1

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม มีค่า 0.020, 0.051, 0.063, 0.125, 0.194, 0.219, 0.286, 0.314 และ 0.502 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.022e^{0.182x}$ จะได้ $R^2 = 0.938$

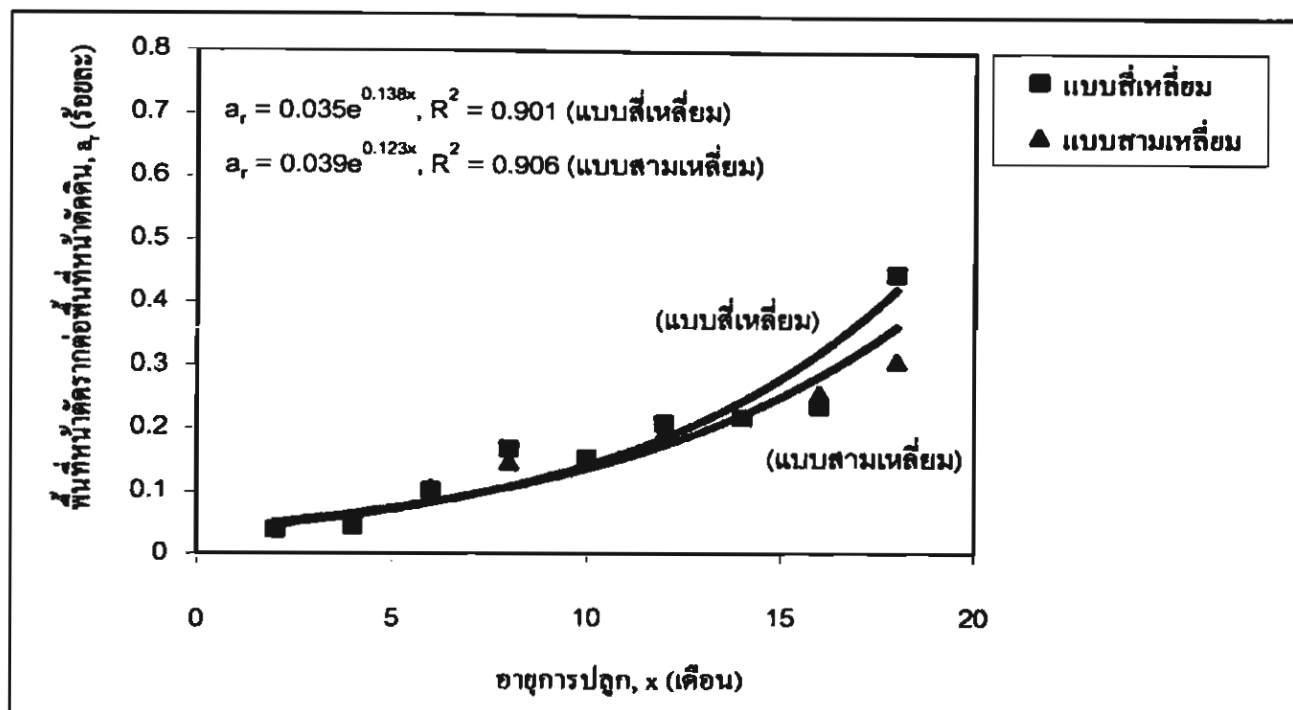
พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสามเหลี่ยม มีค่า 0.020, 0.051, 0.062, 0.086, 0.168, 0.217, 0.256, 0.264 และ 0.310 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.023e^{0.163x}$ จะได้ $R^2 = 0.914$



ภาพที่ 4-32 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 1 กับอายุ การปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-33 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสลับเหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 2 กับอายุ การปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-34 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 3 กับอายุการปลูกในสนาม

รูปแบบการปลูกที่ 2

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม มีค่า 0.064, 0.045, 0.117, 0.118, 0.194, 0.207, 0.218, 0.286 และ 0.429 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.043e^{0.125x}$ จะได้ $R^2 = 0.904$

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสามเหลี่ยม มีค่า 0.012, 0.040, 0.102, 0.104, 0.180, 0.194, 0.223, 0.233 และ 0.250 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.021e^{0.164x}$ จะได้ $R^2 = 0.779$

รูปแบบการปลูกที่ 3

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม มีค่า 0.038, 0.045, 0.100, 0.167, 0.152, 0.208, 0.217, 0.236 และ 0.446 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.035e^{0.138x}$ จะได้ $R^2 = 0.901$

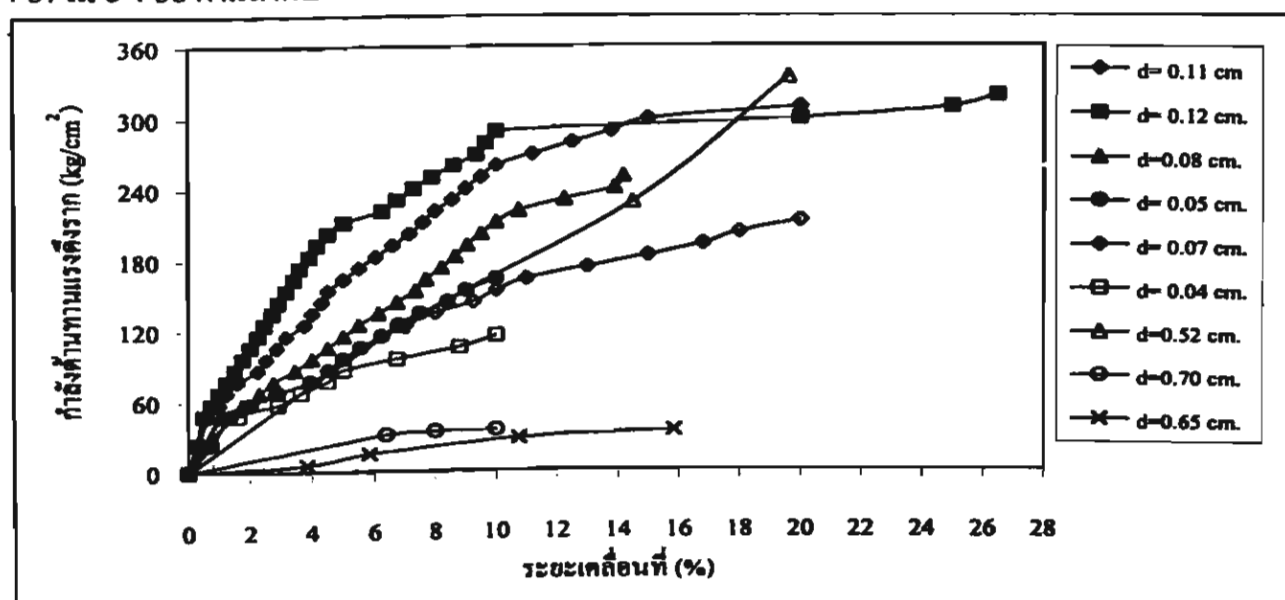
พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสามเหลี่ยม มีค่า 0.044, 0.044, 0.104, 0.146, 0.150, 0.193, 0.218, 0.256 และ 0.308 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.039e^{0.123x}$ จะได้ $R^2 = 0.906$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการปลูกแต่กำลังต้านทานแรงเฉือนที่มีแนวโน้มสูงขึ้นหรือลดลงมีสาเหตุมาจากปริมาณความชื้นในดินนั้นสูงทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนลดลง ผลการทดสอบทางทฤษฎีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรากที่เพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก แต่ผลการทดสอบในสนามได้ที่แตกต่างจากทฤษฎี ซึ่งมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันไปในแต่ละเดือน ทำให้ค่าแรงเฉือนที่จากการทดสอบในสนามไม่ขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยของรากเพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อมด้วย พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีค่าสูงกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบ ซึ่งแสดงความหมายเป็นนัยว่า ถ้าที่ปริมาณความชื้น และอายุการปลูกเดียวกัน ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของรูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบจะมีค่าสูงกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบตามไปด้วย

4.4 ผลการทดสอบแรงดึงดินกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนาม

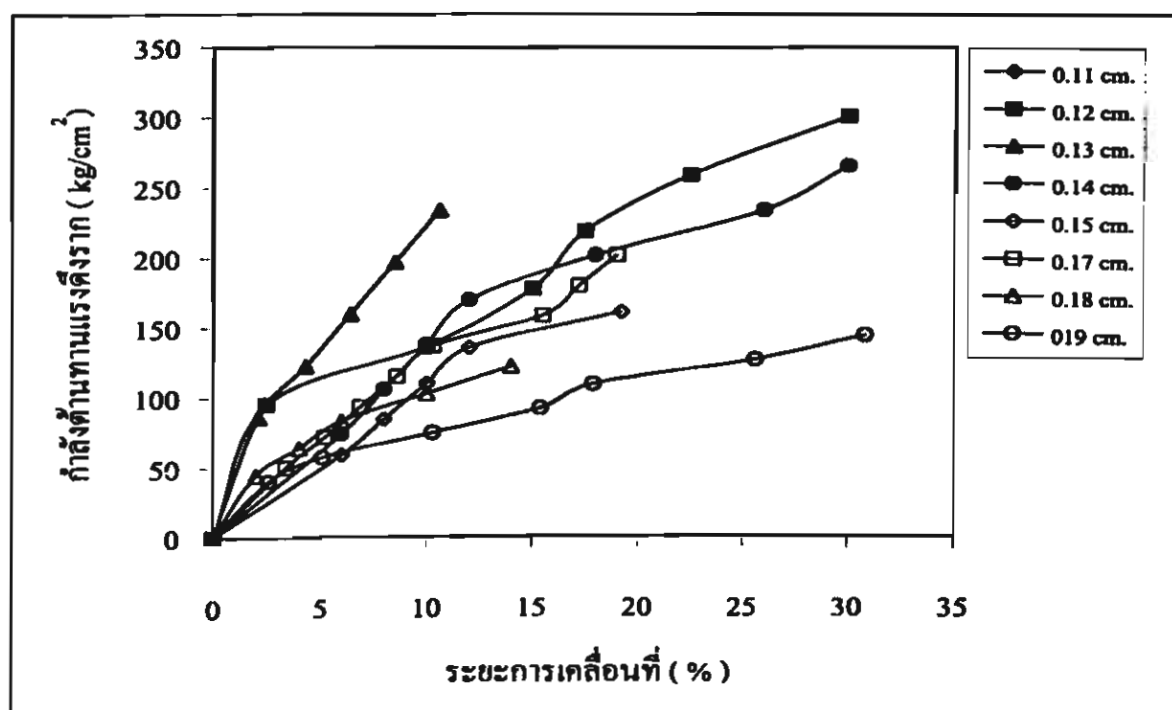
การทดสอบแรงดึงของรากดินกระถินเทพาและหญ้าแฝก ได้ทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างของรากดินกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกมาจากการปลูกในสนามโดยรากที่นำมาทดสอบมีอายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ จากการทดสอบได้นำผลมาหาความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strength กับ Tensile Strain ของรากดินกระถินเทพาและรากหญ้าแฝก ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆของรูปแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 4-35, 4-36, 4-37 และ 4-38 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-35 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strain สูงสุดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากกระถินเทพาในห้องปฏิบัติการของรูปแบบสี่เหลี่ยม

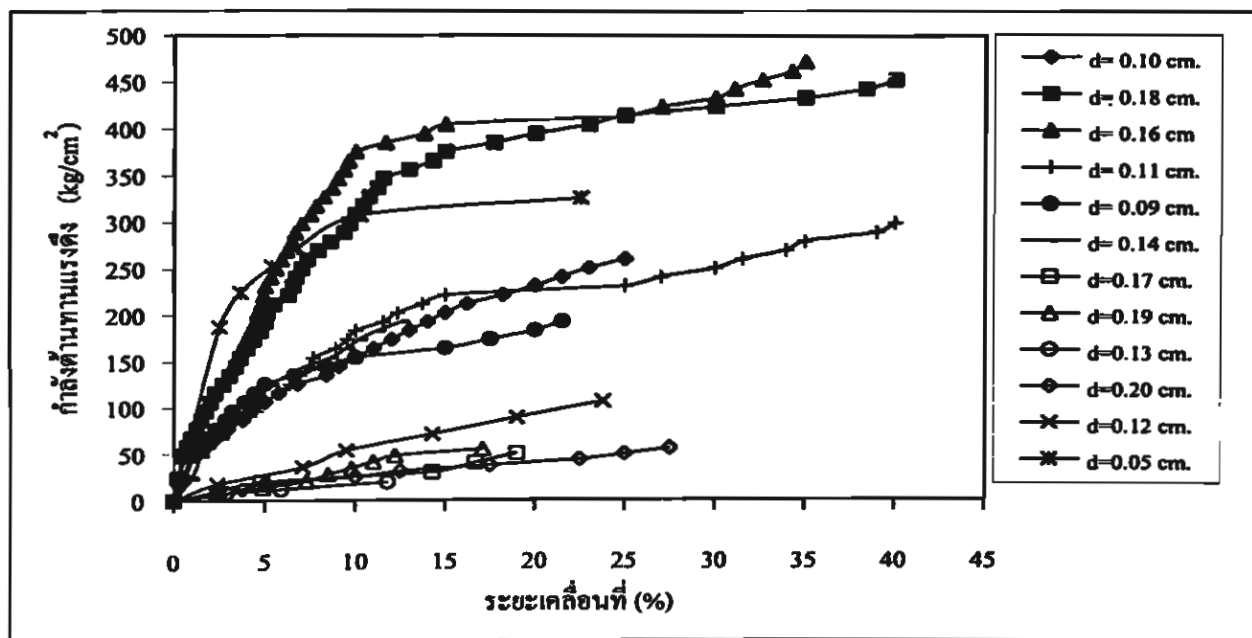
จากภาพที่ 4-35 และ 4-36 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ Tensile Strength กับ Tensile Strain ของ รากต้นกระถินเทพาที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการของทั้งสองรูปแบบ พบว่า ค่า Tensile Strain สูงสุดของรากแต่ละเส้นอยู่ในช่วงระหว่าง 10 - 30 % โดยจากความสัมพันธ์ของกราฟนี้ได้นำผลลัพธ์ที่ได้มาหาความสัมพันธ์ แรงดึงของราก กำลังต้านทานแรงดึงของราก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของราก โดยเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่แตกต่างกัน และอธิบายได้ว่า ในช่วงแรก Strain (%) 0 - 6 % ค่า Stress มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากค่า Strain(%) ระหว่าง 4 – 26 % Stress มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามลำดับ และสังเกตได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางรากที่ขนาดเล็กความสามารถในการรับกำลังต้านทานแรงดึงได้มากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่าสอดคล้องกับการวิจัยของ Greenway [21] , Operstien กับ Frydman [28] และ วราธร, วิชัย และพานิช [3]



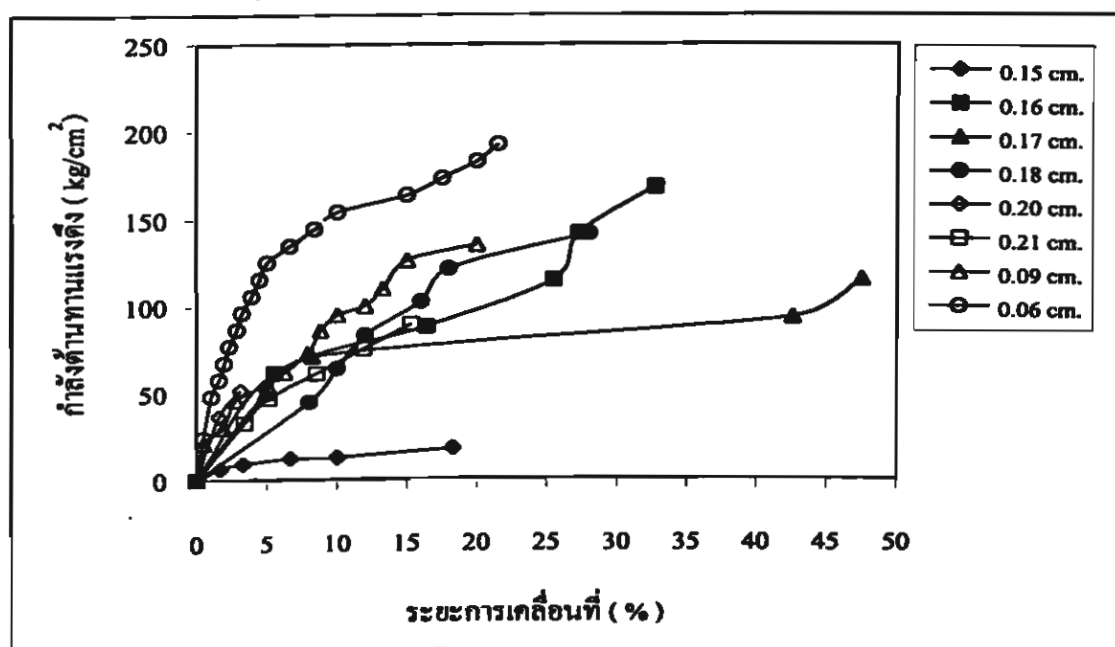
ภาพที่ 4-36 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strain สูงสุดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากกระถินเทพาในห้องปฏิบัติการของรูปแบบตามเหลี่ยม

จากภาพที่ 4-37 และ 4-38 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ Tensile Strength กับ Tensile Strain ของ รากหญ้าแฝกที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการของทั้งสองรูปแบบ พบว่าค่า Tensile Strain สูงสุดของรากแต่ละเส้นอยู่ในช่วงระหว่าง 12 - 40 % โดยจากความสัมพันธ์ของกราฟนี้ได้นำผลลัพธ์ที่ได้มาหาความสัมพันธ์ แรงดึงของราก กำลังต้านทานแรงดึงของราก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของราก โดยเทียบกับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่แตกต่างกัน และอธิบายได้ว่า ในช่วงแรก Strain

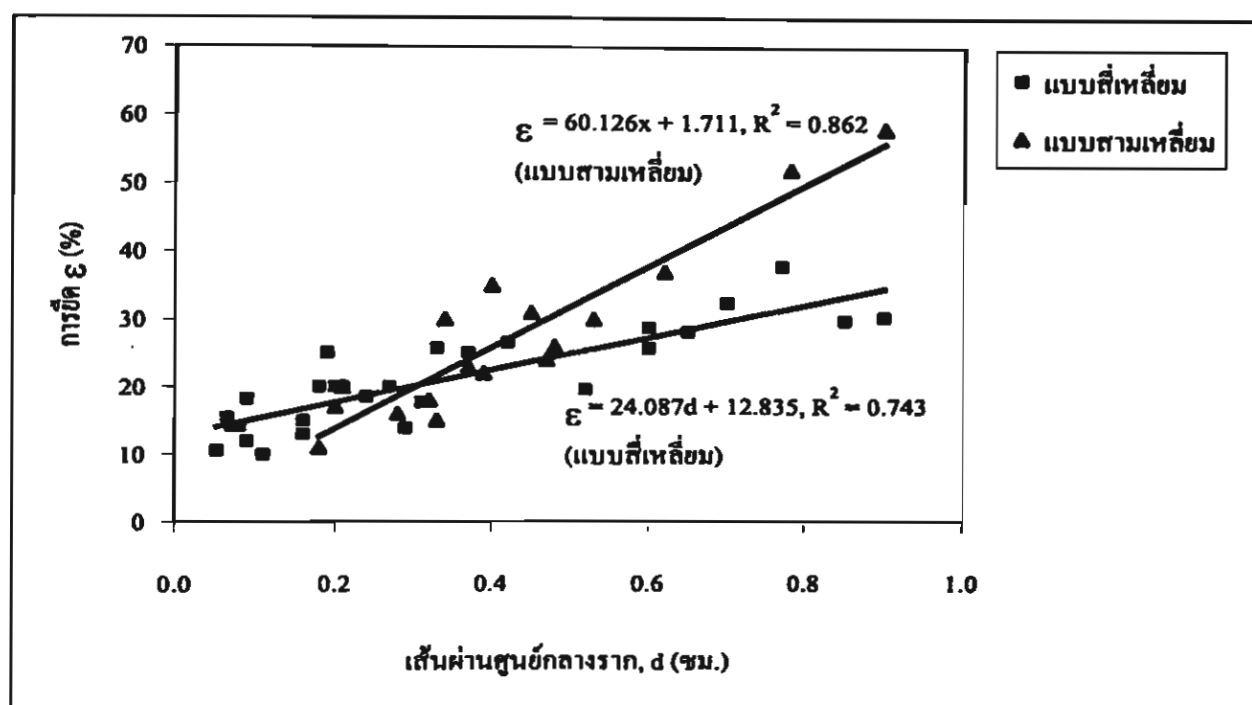
(%) 0 - 12 % ค่า Stress มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากค่า Strain(%) ระหว่าง 12 – 40 % Stress มีค่าเพิ่มขึ้นอย่าง ช้าๆ ตามลำดับ และสังเกตได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางรากที่ขนาดเล็กความสามารถในการรับกำลังต้านทานแรงดึงได้มากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า สอดคล้องกับการวิจัยของ Greenway [21] , Operstien กับ Frydman [28] และ วราธร, วิชัย และพานิช [3]



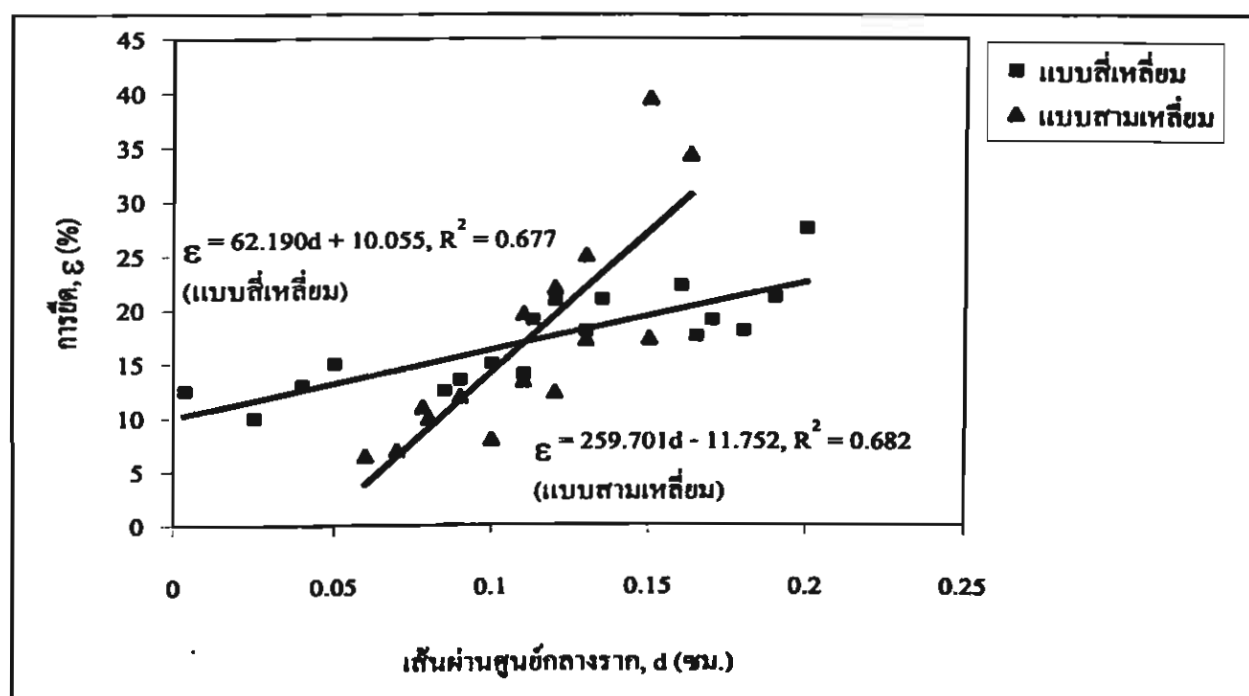
ภาพที่ 4-37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strain สูงสุดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รากหญ้าแฝก แบบสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 4-38 ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strain สูงสุดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รากหญ้าแฝก แบบสี่เหลี่ยม



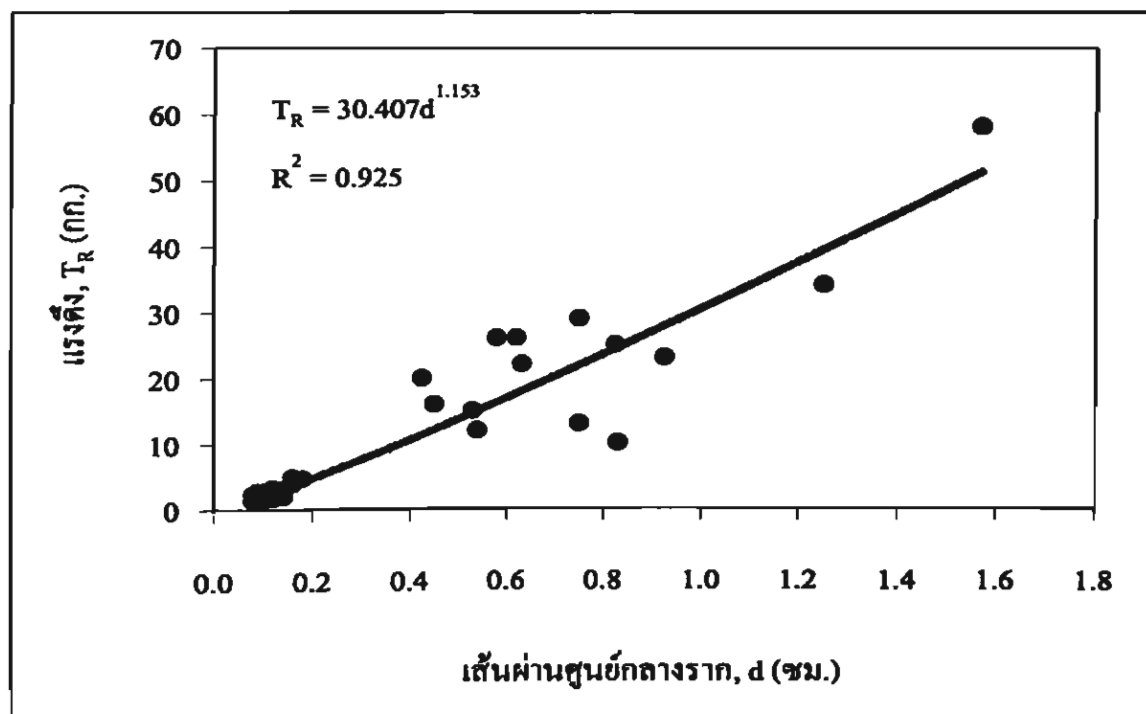
ภาพที่ 4-39 ความสัมพันธ์ระหว่างการยืด Tensile Strain สูงสุด กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รากดินกระดินเทาในรูปแบบการปลูกแบบตี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4-40 ความสัมพันธ์ระหว่างการยืด Tensile Strain สูงสุด กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รากหญ้าแฝกในรูปแบบการปลูกแบบตี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม

จากภาพที่ 4-39 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ การยืด Tensile Strain สูงสุด กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากดินกระถินเทพาในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม วิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยได้ดังนี้ คือ $\epsilon = 24.087d + 12.835$ ($R^2=0.743$) และ $\epsilon = 60.126d + 1.711$ ($R^2=0.862$) ตามลำดับ และ Tensile Strain มีแนวโน้มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากพืชที่เพิ่มขึ้น

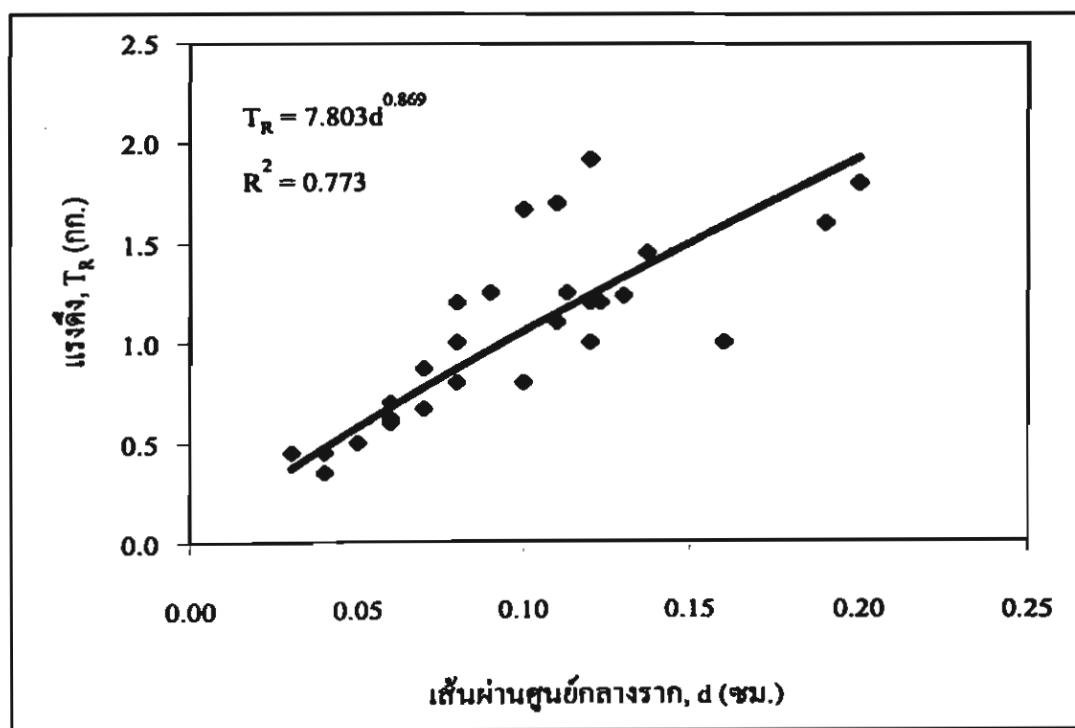
จากภาพที่ 4-40 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ การยืด Tensile Strain สูงสุด กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากหญ้าแฝกในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม วิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยได้ดังนี้ คือ $\epsilon = 62.190d + 10.055$ ($R^2=0.677$) และ $\epsilon = 259.701d - 11.752$ ($R^2=0.682$) ตามลำดับ และ Tensile Strain มีแนวโน้มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากพืชที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (Tensile Force) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพา

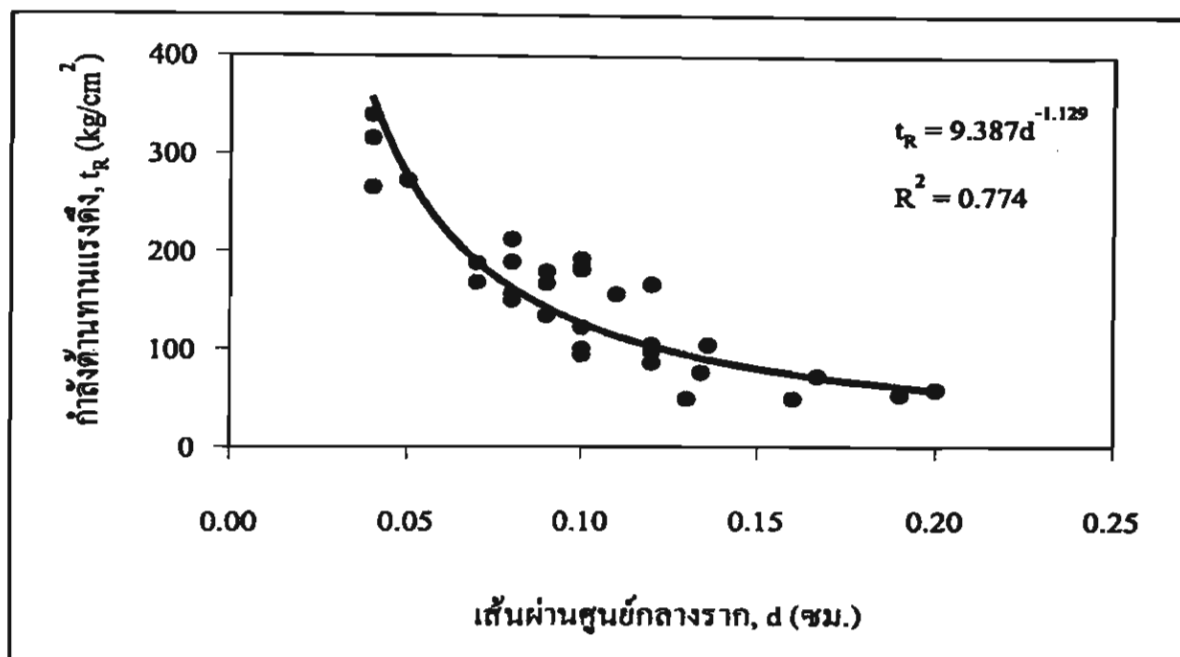
จากภาพที่ 4-41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (Tensile Force) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพา ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการเส้นถดถอย(Regression Analysis) พบว่าค่าแรงดึงของรากกระถินเทพามีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพามีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจากการทดลองผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของวราธร, วิชัย และพานิช [3] ซึ่งได้ศึกษาความสัมพันธ์แรงดึงของรากหญ้าแฝก และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพา

ได้คือ $T_R = 30.407d^{1.153}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.925$ และค่าของแรงดึงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 1.1 ถึง 58 กิโลกรัม โดยที่รากของดินกระถิ่นเทพามีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.08 ถึง 1.57 เซนติเมตร

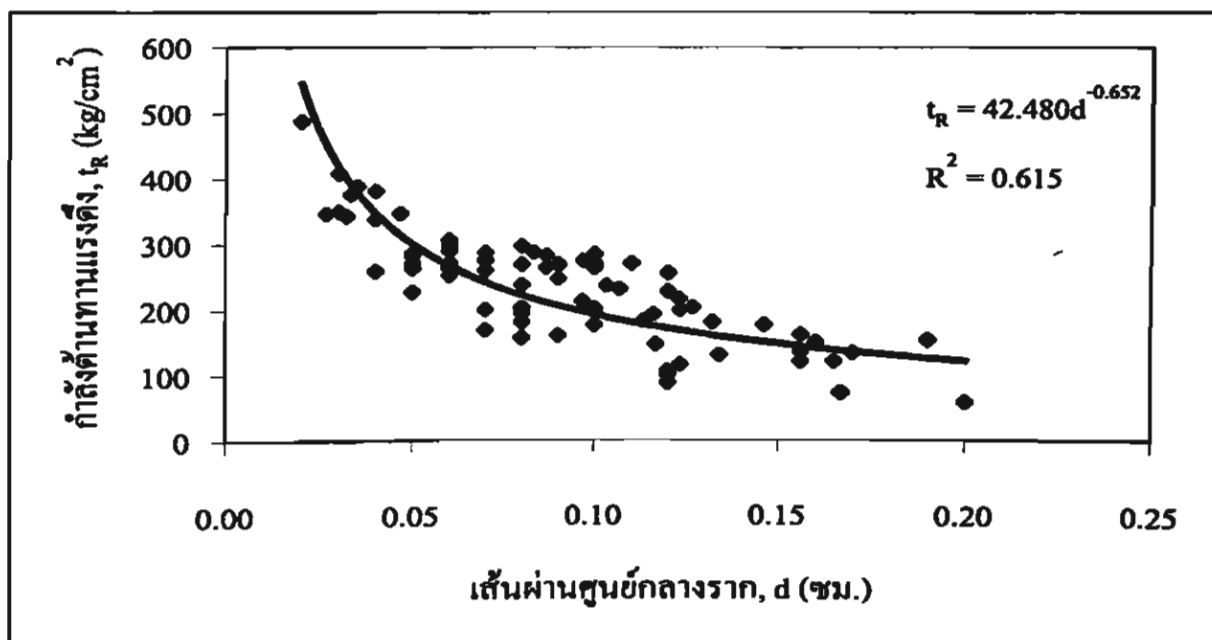


ภาพที่ 4-42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (Tensile Force) กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ รากหญ้าแฝก

จากภาพที่ 4-42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (Tensile Force) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการเส้นถดถอย(Regression Analysis) พบว่าค่าแรงดึงของรากหญ้าแฝกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นหญ้าแฝกได้คือ $T_R = 7.803d^{0.869}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.773$ และค่าของแรงดึงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 1.92 กิโลกรัม โดยที่รากของหญ้าแฝกมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.03 ถึง 0.2 เซนติเมตร ซึ่งจากการทดลองผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของวราธร, วิชัย และพานิช [3] ซึ่งได้ศึกษาความสัมพันธ์แรงดึงของรากหญ้าแฝก



ภาพที่ 4-43 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากค้ำยันกระถินเทพา



ภาพที่ 4-44 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากหญ้าแฝก

จากภาพที่ 4-43 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรากค้ำยันกระถินเทพาได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการเส้นถดถอย

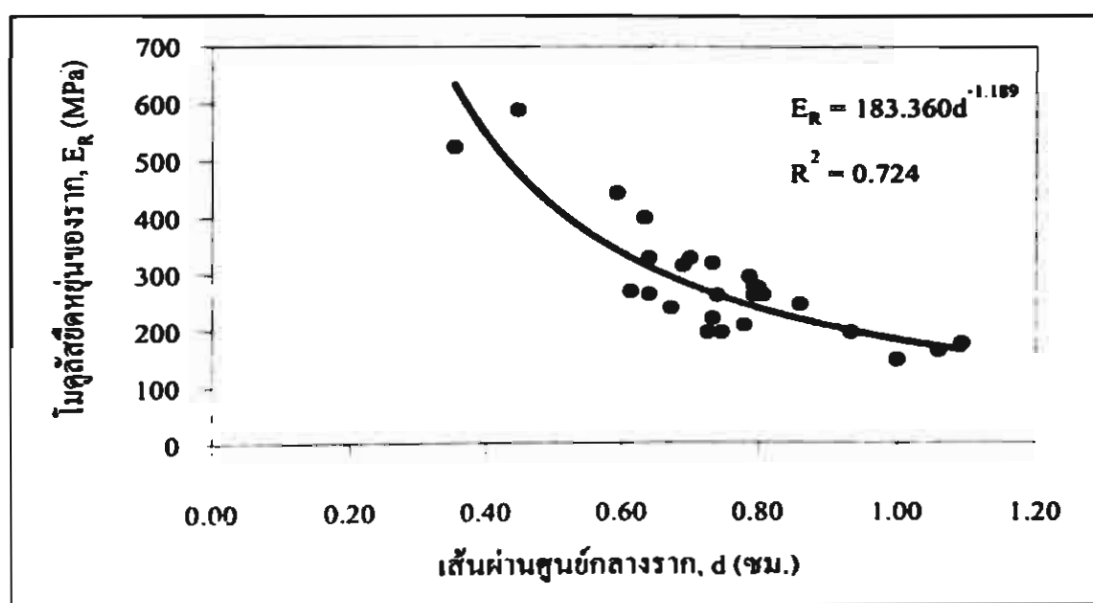
(Regression Analysis) พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของรากต้นกระถินเทพา มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นกระถินเทพามีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Greenway [21] , Operstien กับ Frydman [28] และ วราธร, วิชัย และพานิช [3] และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นกระถินเทพาได้คือ $t_r = 9.387d^{-1.129}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.774$ กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 49 ถึง 315 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่รากของต้นกระถินเทพามีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.20 เซนติเมตร

จากภาพที่ 4-44 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการเส้นถดถอย (Regression Analysis) พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของรากหญ้าแฝกมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกมีขนาดใหญ่ขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Greenway [21] , Operstien กับ Frydman [28] และวราธร, วิชัย และพานิช [3] และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก คือ $t_r = 42.480 d^{-0.652}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.615$ กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 19 ถึง 407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่รากของหญ้าแฝกมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.02 ถึง 0.20 เซนติเมตร

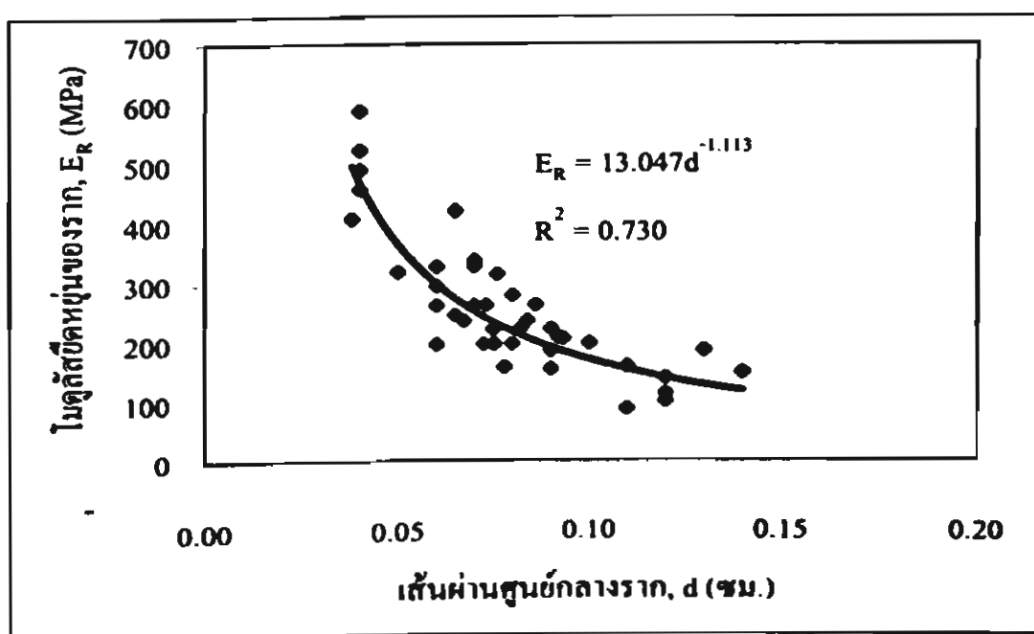
จากภาพที่ 4-45 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นกระถินเทพา จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอย (Regression Analysis) พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีขนาดเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับการวิจัยของ Operstien กับ Frydman [28] และวราธร, วิชัย และพานิช [3] จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากได้คือ $E_r = 183.360d^{-1.189}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.724$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 147.15 ถึง 588.00 MPa โดยที่รากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.353 ถึง 1.093 มิลลิเมตร -

จากภาพที่ 4-46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอย (Regression Analysis) พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากจะแปรผกผันเพิ่มสูงขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีขนาดเล็กลง สอดคล้องกับการวิจัยของ Operstien กับ Frydman [28] และวราธร,

วิชัย และพานิช [3] จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากได้คือ $E_R = 13.047d^{-1.113}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.730$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 85 ถึง 588 MPa โดยที่รากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.14 เซนติเมตร



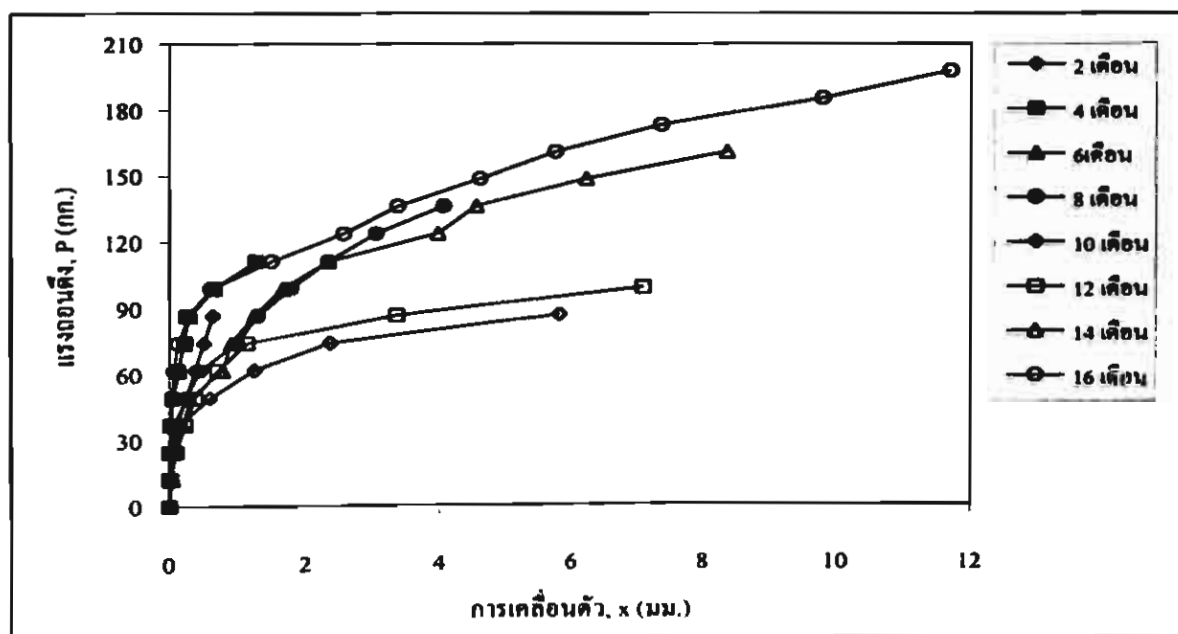
ภาพที่ 4-45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นกระถินเทพา



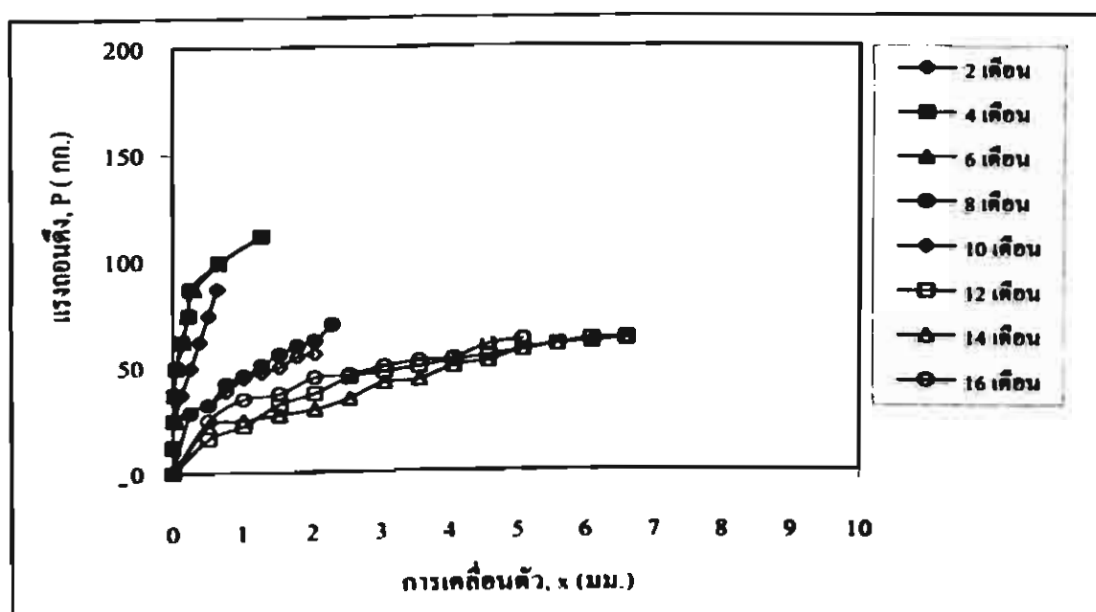
ภาพที่ 4-46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก

4.5 ผลการทดสอบแรงถอนตึงต้นกระถินเทพาและกอกหญ้าแฝกในสนาม

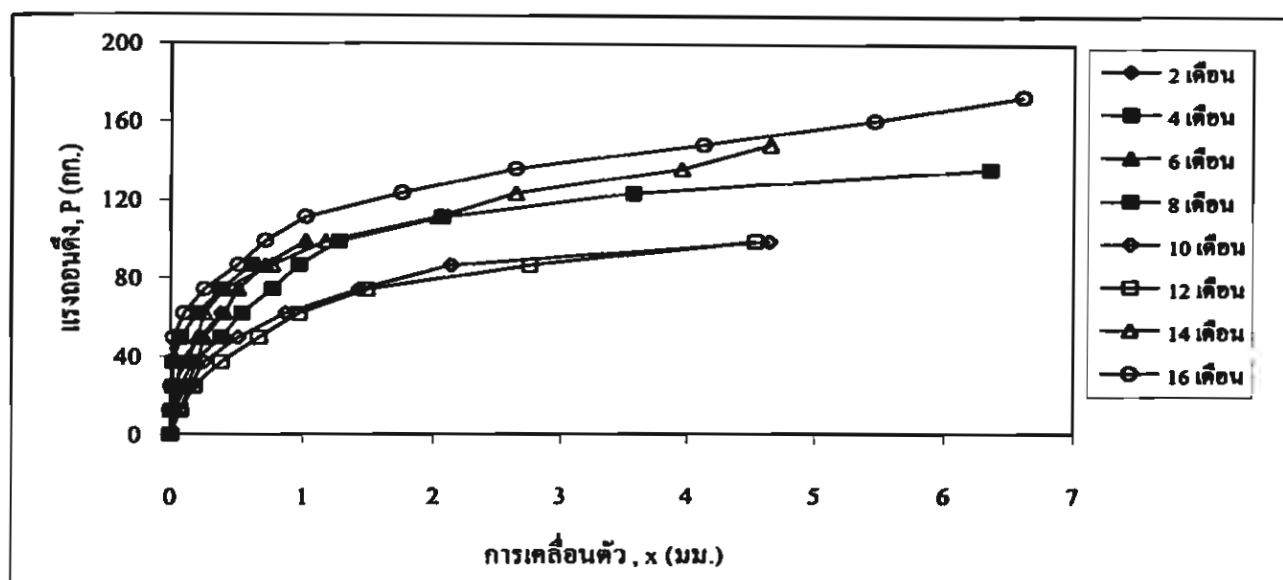
จากการทดสอบแรงถอนตึงต้นกระถินเทพา และกอกหญ้าแฝกในสนามทั้งรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอน (Pull-Out Force) กับระยะการเคลื่อนตัว (Pull-Out Displacement) ดังภาพที่ 4-47, 4-48, 4-49 และ 4-50 ตามลำดับ



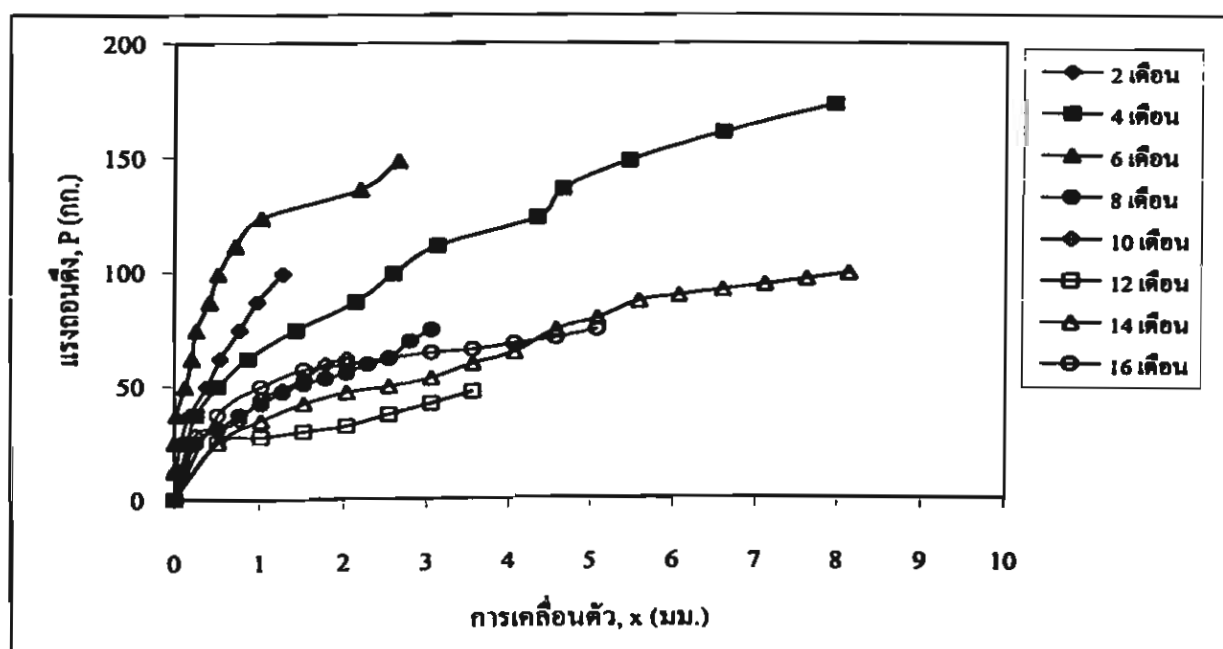
ภาพที่ 4-47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนตึง และระยะการเคลื่อนตัวของต้นกระถินเทพาในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม ที่อายุการปลูกต่างๆ



ภาพที่ 4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนตึง และระยะการเคลื่อนตัวของต้นกระถินเทพาในรูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูกต่างๆ



ภาพที่ 4-49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดึง และระยะการเคลื่อนตัวของกอกหญ้าแฝกในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม ที่อายุการปลูกต่างๆ



ภาพที่ 4-50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดึง และระยะการเคลื่อนตัวของกอกหญ้าแฝกในรูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูกต่างๆ

จากภาพที่ 4-47 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดึง (Pull-Out Force) กับระยะการเคลื่อนตัว (Pull-Out Displacement) ของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม ได้แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของรากต้นกระถินเทพาขึ้นจากดินในแนวดิ่ง ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟความสัมพันธ์ในอายุการ

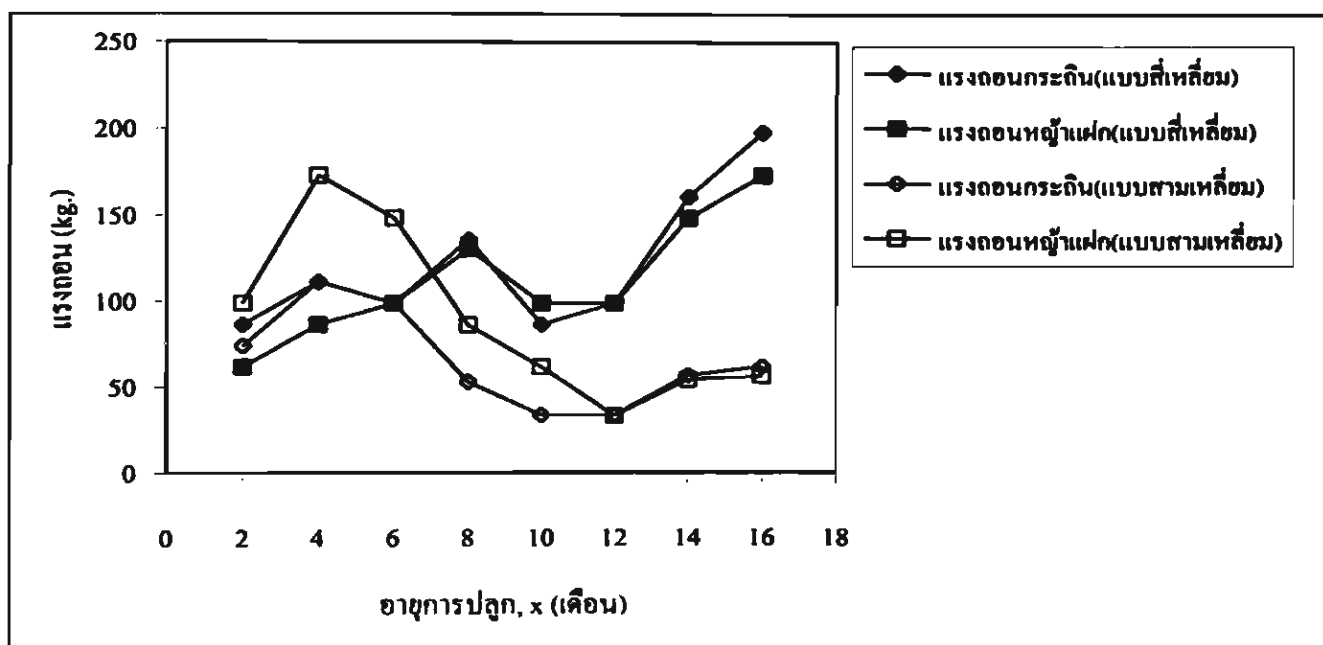
ปลุกจะมีแนวโน้มของแรงถอนดึงสูงในระหว่างการเคลื่อนตัวที่ 0 ถึง 0.6 มิลลิเมตรแรกและหลังจากนั้นการเคลื่อนตัวจะมีระยะการเคลื่อนตัวห่างมากขึ้น โดยที่แรงดึงก็เพิ่มขึ้นและจากกราฟจะเห็นว่าแรงถอน(Pull-Out Force) กับระยะการเคลื่อนตัว (Pull-Out Displacement) ที่อายุการปลูก 4 เดือนมีค่าสูงกว่าที่อายุการปลูก 6 เดือน และ อายุการปลูกที่ 8 เดือนมีค่าสูงกว่าเดือนที่ 10 และ 12 ซึ่งเป็นค่าที่ผิดไปจากทฤษฎีนั้นสาเหตุเนื่องมาจากปริมาณความชื้นในดินมีค่าสูง

จากภาพที่ 4-48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-Out Force กับ Pull-Out Displacement ได้แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของรากต้นกระถินเทพาขึ้นจากดินในแนวตั้งของรูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยม ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟจะมีแนวโน้มของแรงดึงสูงขึ้นเร็วมากในระหว่างการเคลื่อนตัวที่ 0 ถึง 0.5 มิลลิเมตรแรก และหลังจากนั้นการเคลื่อนตัวจะมีระยะการเคลื่อนตัวห่างมากขึ้น โดยที่แรงดึงเพิ่มขึ้นทีละนิดและหลังจากนั้นการเคลื่อนตัวจะมีระยะการเคลื่อนตัวห่างมากขึ้น โดยที่แรงดึงก็เพิ่มขึ้นและจากกราฟจะเห็นว่า Pull-Out Force กับ Pull-Out Displacement ที่อายุการปลูก 4 เดือนมีค่าสูงกว่าที่อายุการปลูก 6 เดือน และสูงกว่าเดือนที่ 8, 10, 12, 14, 16 ซึ่งเป็นค่าที่ผิดไปจากทฤษฎีนั้นสาเหตุเนื่องมาจากปริมาณความชื้นในดินที่ 6 มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

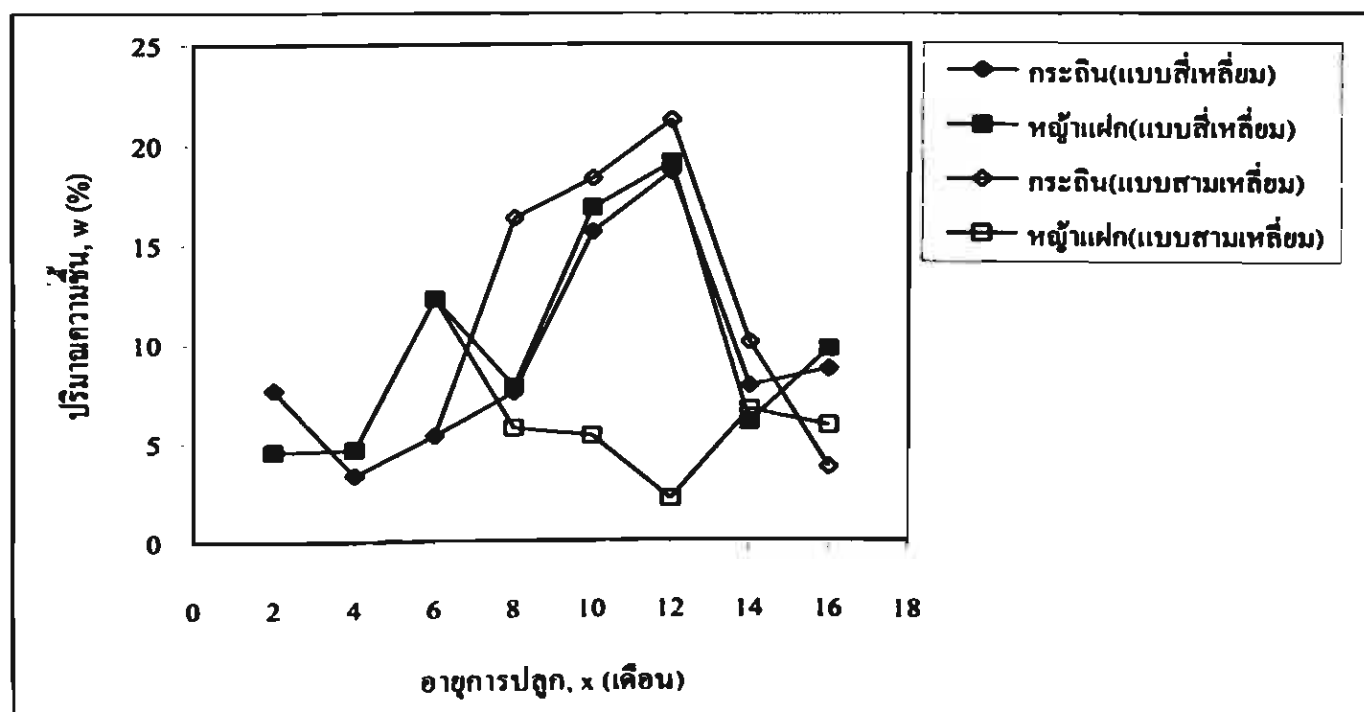
จากภาพที่ 4-49 และ 4-50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดึง (Pull-Out Force) กับระยะการเคลื่อนตัว (Pull-Out Displacement) ได้แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของรากต้นหญ้าแฝกขึ้นจากดินในแนวตั้ง ซึ่งลักษณะของเส้นกราฟความสัมพันธ์ในอายุการปลูกจะมีแนวโน้มของแรงถอนดึงสูงในระหว่างการเคลื่อนตัวที่ 0 ถึง 0.5 มิลลิเมตรแรกและหลังจากนั้นการเคลื่อนตัวจะมีระยะการเคลื่อนตัวห่างมากขึ้น โดยที่แรงดึงก็เพิ่มขึ้นและจากกราฟจะเห็นว่าแรงถอนดึง (Pull-Out Force) กับระยะการเคลื่อนตัว (Pull-Out Displacement) ที่อายุการปลูกเพิ่มขึ้นน่าจะมีค่าแรงถอนดึงที่เพิ่มขึ้นแต่ค่าที่ได้นั้นเป็นค่าที่ผิดไปจากทฤษฎีนั้นสาเหตุเนื่องมาจากปริมาณความชื้นในดินมีค่าสูง

การทดสอบแรงถอนดึงต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนาม กำลังด้านทานแรงถอนดึงจะอาศัยแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวที่ของรากกับดินกับกำลังด้านทานการดึงของราก โดยจะขึ้นอยู่กับ การเจริญเติบโตของรากที่ขุดเกาะอยู่กับอนุภาคของดิน และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดิน ซึ่งแสดงดังภาพต่อไปนี้

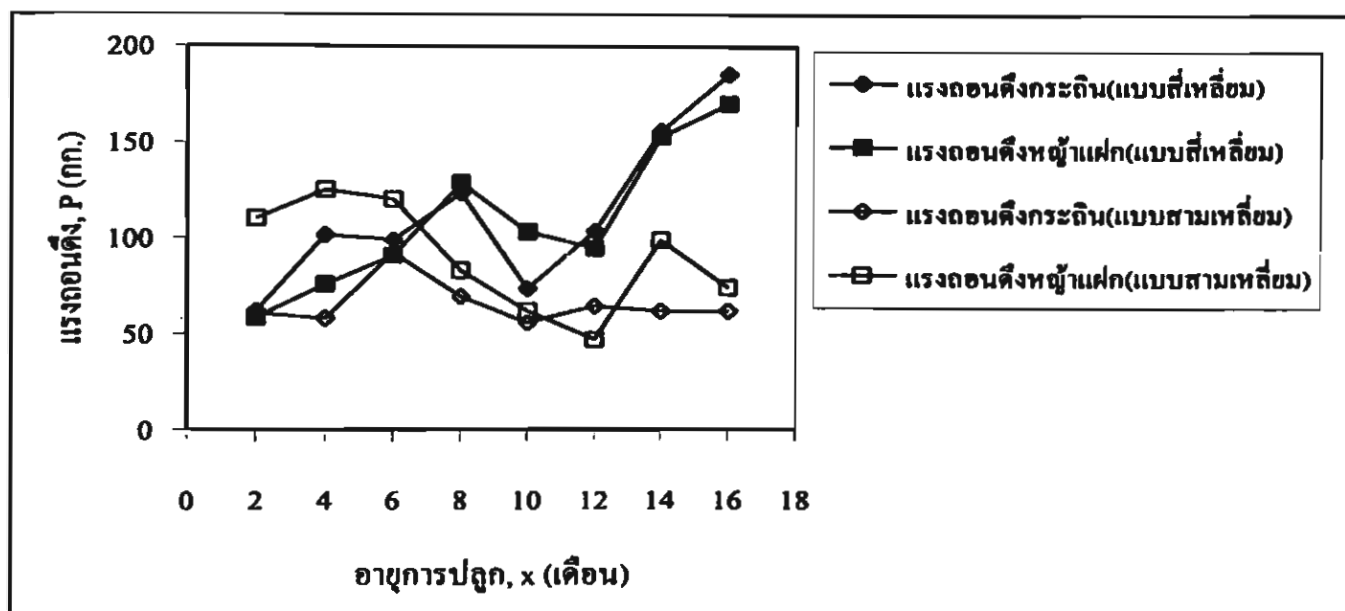
จากภาพที่ 4-51, 4-52, 4-53, 4-54, 4-55 และ 4-56 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดึงกับอายุการปลูกในแต่ละเดือนและผลกระทบเนื่องจากปริมาณความชื้นในดินขณะทดสอบของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม โดยที่อายุการทดสอบ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือน ตามลำดับ พบว่า แรงถอนดึงของหญ้าแฝกและกระถินเทพาในสนามมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามอายุการปลูก แต่จะต้องพิจารณาในความชื้นที่ใกล้เคียงกัน



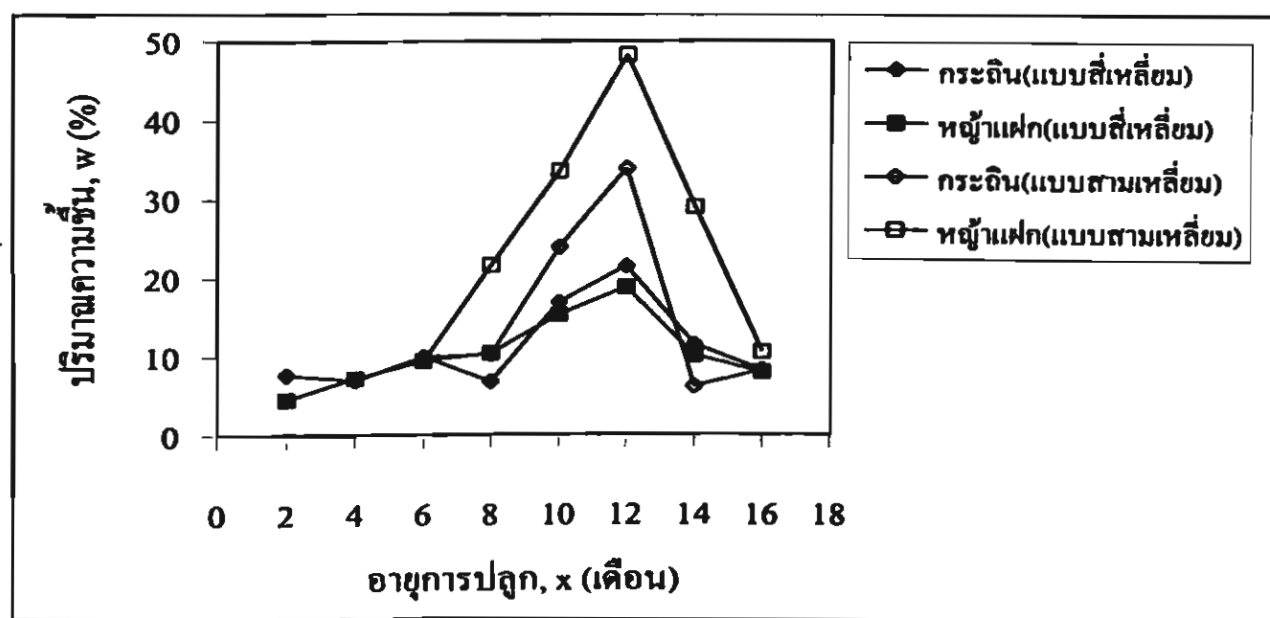
ภาพที่ 4-51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตอนดินของกระดินเทพา และหญ้าแฝก การปลูกแบบ
สี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 1 กับอายุการปลูกในสนาม



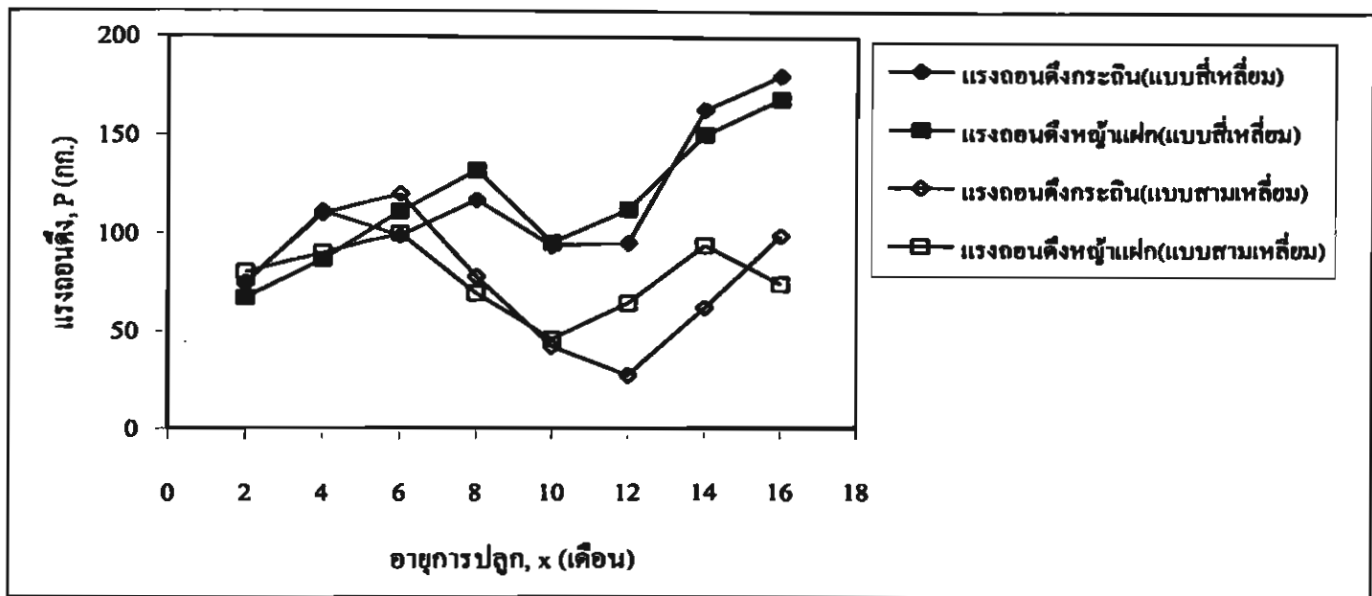
ภาพที่ 4-52 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของกระดินเทพา และหญ้าแฝก การปลูกแบบ
สี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 1 กับอายุการปลูกในสนาม



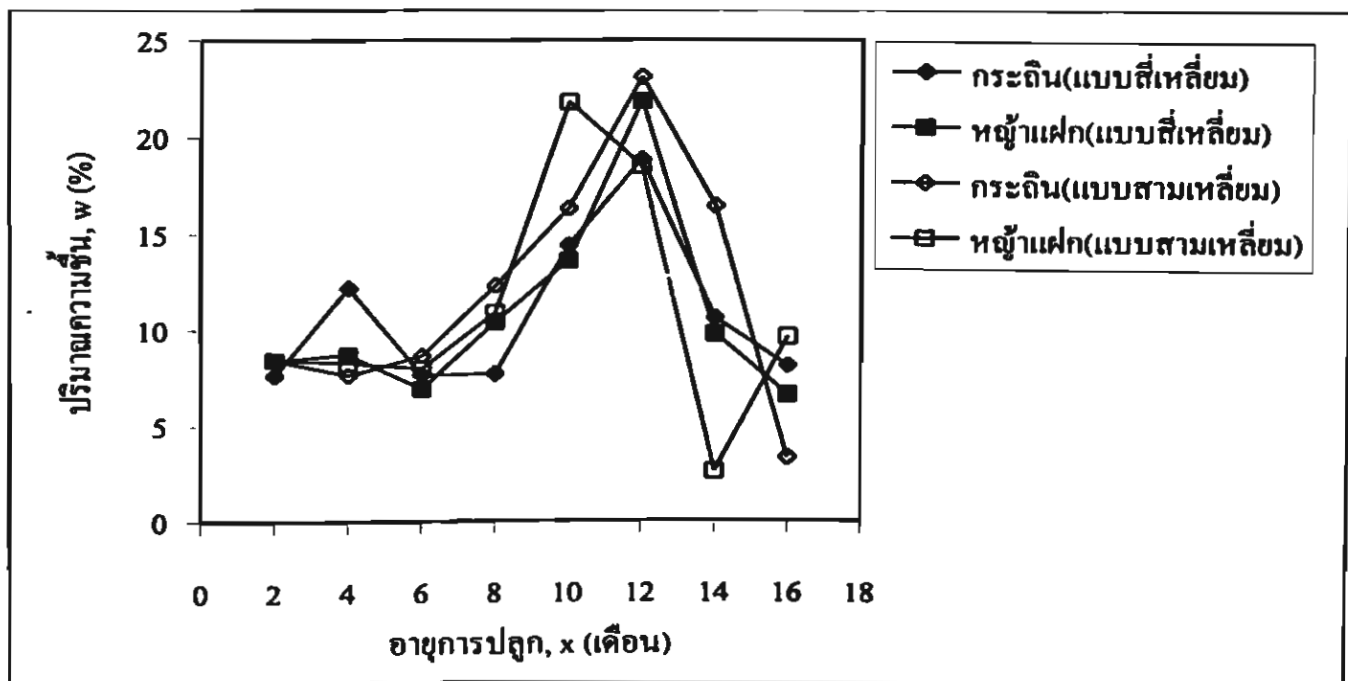
ภาพที่ 4-53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอดึงของกระถินเทพา และหญ้าแฝก การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 2 กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-54 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของกระถินเทพา และหญ้าแฝก การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 2 กับอายุการปลูกในสนาม

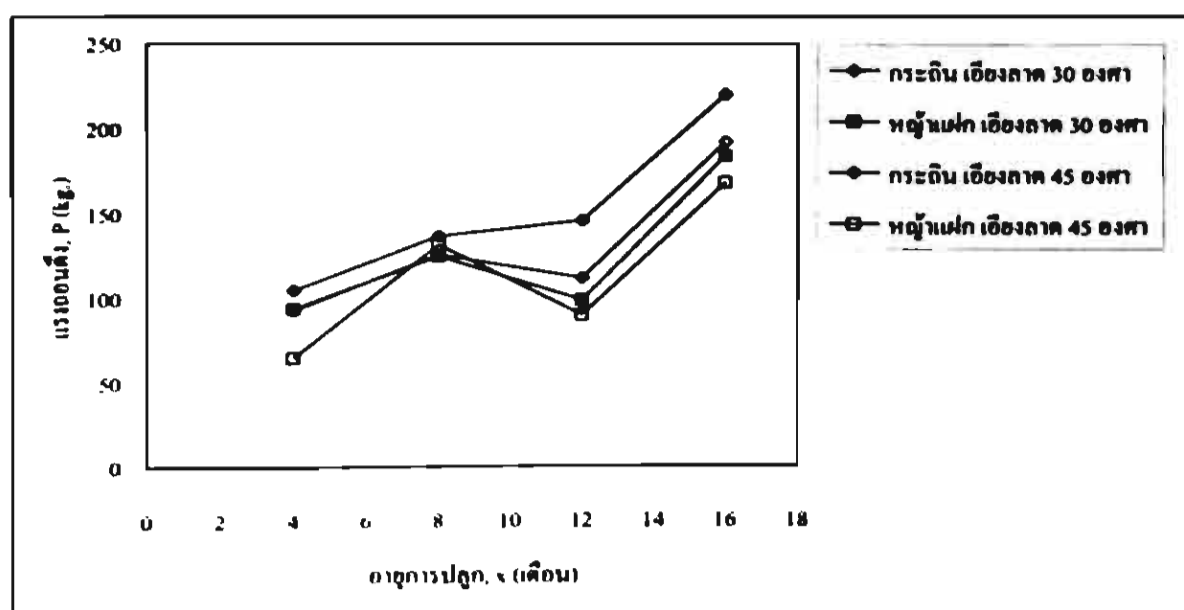


ภาพที่ 4-55 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดดินของกระดินเทพา และหญ้าแฝก การปลูกแบบที่เหนียว และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 3 กับอายุการปลูกในสนาม

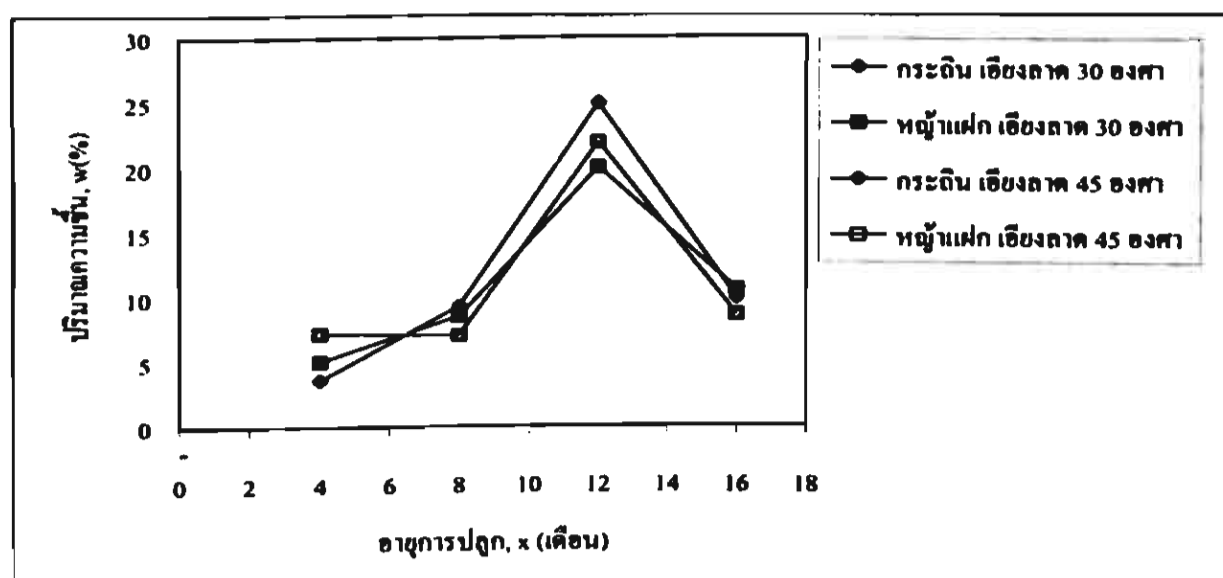


ภาพที่ 4-56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของกระดินเทพา และหญ้าแฝก การปลูกแบบที่เหนียว และแบบสามเหลี่ยม รูปแบบที่ 3 กับอายุการปลูกในสนาม

เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน แรงกดดันของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งมีปริมาณความชื้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาที่ปริมาณความชื้นเดียวกันตลอดอายุการปลูกก็จะพบว่าแรงกดดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-57 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดดันของกระถินเทพา และหญ้าแฝกที่ปลูกในแนวอิงลาด กับอายุการปลูกในสนาม



ภาพที่ 4-58 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของกระถินเทพา และหญ้าแฝกที่ปลูกในแนวอิงลาด กับอายุการปลูกในสนาม

ภาพที่ 4-57 และ 4-58 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดึงกับอายุการปลูกในแต่ละเดือนและผลกระทบเนื่องจากปริมาณความชื้นในดินขณะทดสอบที่ปลูกในแนวเฉียงลาดโดยที่อายุการทดสอบ 4, 8, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ดังนี้

ความลาดเอียง 30 องศา

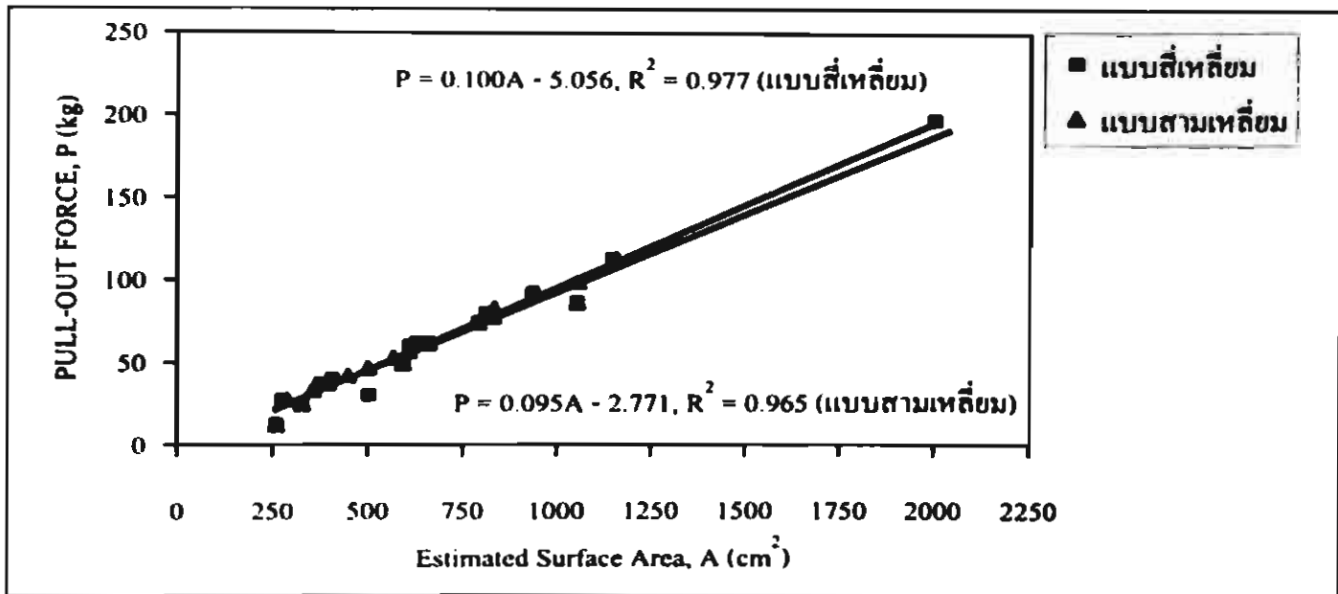
แรงถอนดึงของรากกระถินเทพาในสนาม ได้ผลการทดสอบดังนี้ 105, 137, 146 และ 220 กิโลกรัมตามลำดับ คิดเป็น 1.30, 1.39 และ 2.10 เท่าของการทดสอบในเดือนที่ 4 ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบในสนาม 3.67, 9.37, 18.25 และ 9.93 % ตามลำดับ และ แรงถอนดึงของรากหญ้าแฝกในสนาม ได้ผลการทดสอบดังนี้ 94, 125, 99 และ 184 กิโลกรัมตามลำดับ คิดเป็น 1.33, 1.06 และ 1.96 เท่าของการทดสอบในเดือนที่ 4 ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบในสนาม 5.10, 8.58, 19.00 และ 10.6 % ตามลำดับ

ความลาดเอียง 45 องศา

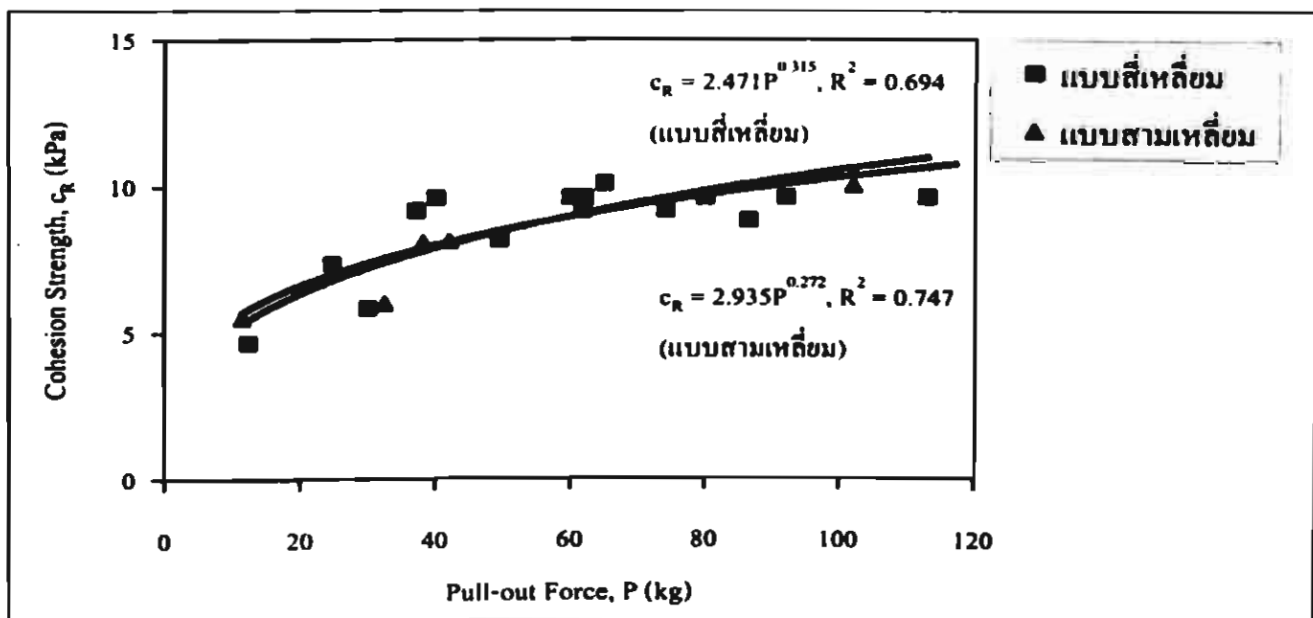
แรงถอนดึงของรากกระถินเทพาในสนาม ได้ผลการทดสอบดังนี้ 93, 126, 112 และ 192 กิโลกรัมตามลำดับ คิดเป็น 1.35, 1.20 และ 2.06 เท่าของการทดสอบในเดือนที่ 4 ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบในสนาม 7.26, 7.12, 21.9 และ 8.64 % ตามลำดับ และแรงถอนดึงของรากหญ้าแฝกในสนามที่อายุการปลูก 4, 8, 12 และ 16 เดือน ได้ผลการทดสอบดังนี้ 65, 132, 90 และ 168 กิโลกรัม ตามลำดับ คิดเป็น 2.03, 1.39 และ 2.59 เท่าของการทดสอบในเดือนที่ 4 ปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบในสนาม 7.95, 10.92, 19.2 และ 8.36% ตามลำดับ

ดังนั้น ค่าแรงถอนดึงของต้นกระถินเทพา และกอหญ้าแฝกที่ความลาดชัน 30 องศาจะมีค่ามากกว่าความลาดชัน 45 องศาที่อายุการปลูกเดียวกัน และค่าแรงถอนดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้นเมื่อไม่พิจารณาปริมาณความชื้น

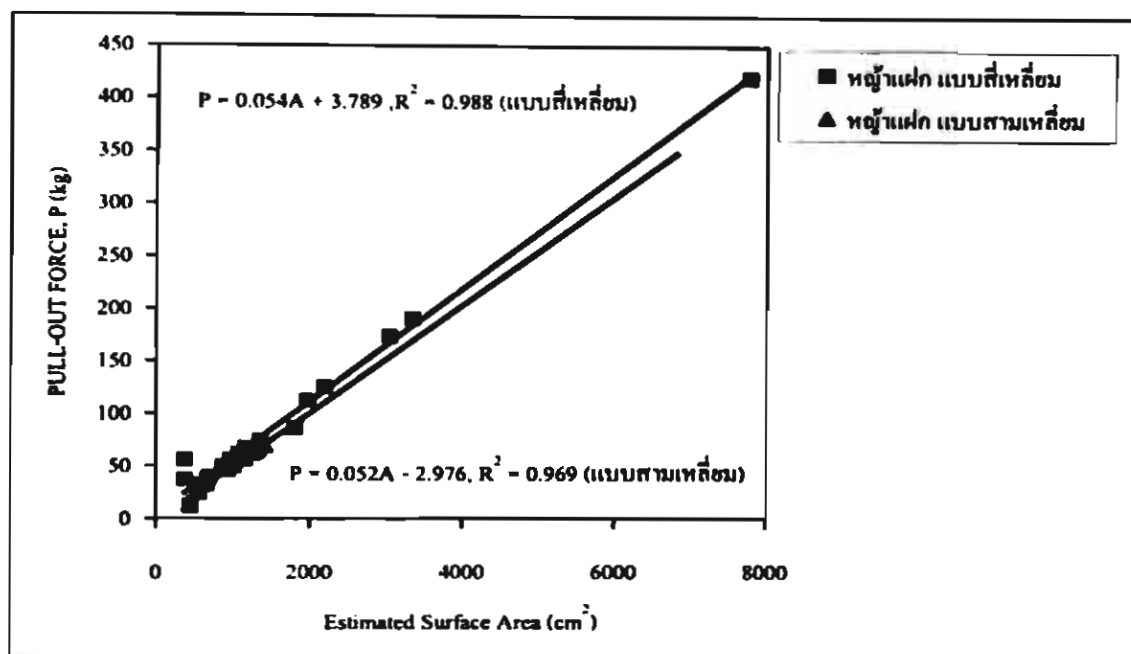
ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pull-out Force กับ Estimated Surface area และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงถอน (Pull-out Force) กับ Cohesion Strength โดยทดสอบที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม โดยทดสอบจะอาศัยความเสียดทานของผิวรากกับดิน ดังภาพที่ 4-59, 4-60, 4-61 และ 4-62 ตามลำดับ พบว่าค่า Pull-out Force มีแนวโน้มต่ำลงเมื่อ Estimated Surface area มีค่ามากขึ้น และค่าของ Cohesion Strength จะแปรผันกับค่า Pull-out Force ถ้า Pull-out Force มีค่ามาก ค่าของ Cohesion Strength ก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Operstien and Fryman [28] โดยทำการศึกษาหญ้าแกลนที่ปลูกในดินร่วน



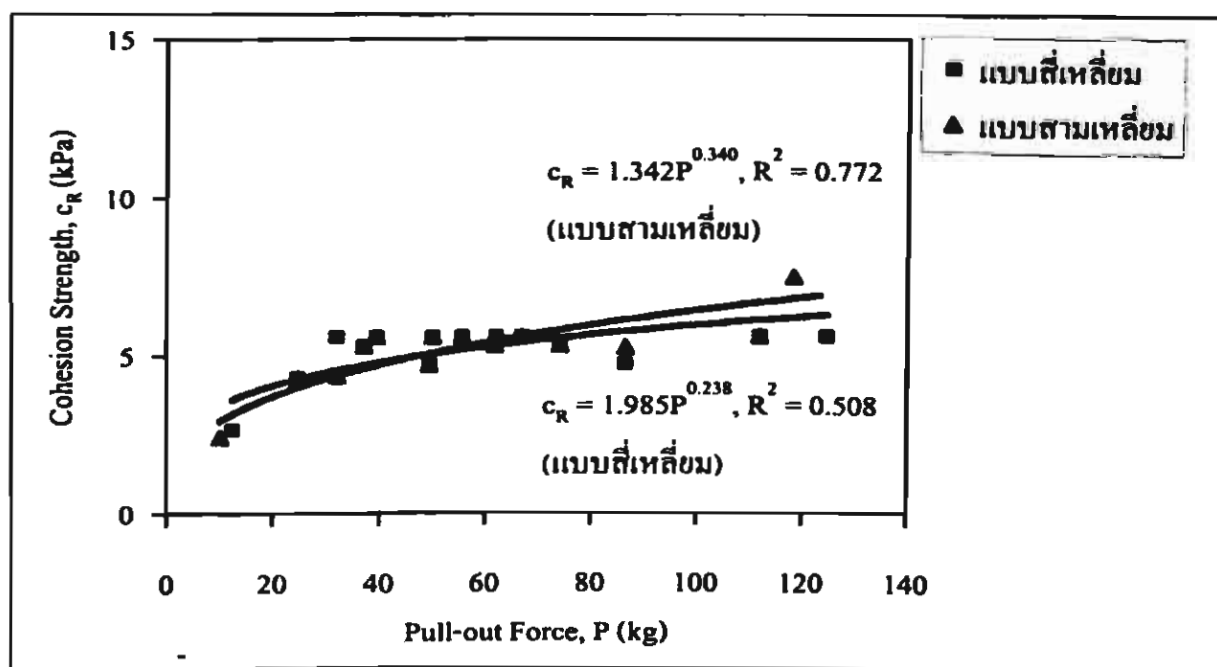
ภาพที่ 4-59 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pull - out Force กับ Estimated Surface Area ของรากกระดินเทพา การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4-60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pull-out Force กับ Cohesion Strength ของรากกระดินเทพา แบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4-61 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pull – out Force กับ Estimated Surface Area ของราก หูแร่ การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม



ภาพที่ 4-62 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Pull-out Force กับ Cohesion Strength ของรากหูแร่ แบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเชิงเส้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-out Force กับ Estimated Surface area และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงถอน (Pull-out Force) กับ Cohesion Strength ของดินกระถินเทพาที่ได้ดังต่อไปนี้ คือ

รูปแบบสี่เหลี่ยม

$P = 0.100A - 5.056$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.977 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละดินอยู่ในช่วงระหว่าง 13.32 ถึง 86.48 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 259.39 ถึง 1052.15 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 2.471P^{0.3151}$ จะได้ $R^2=0.694$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12.355 ถึง 113 กิโลกรัม และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.67 ถึง 10.1 กิโลปาสกาล

รูปแบบสามเหลี่ยม

$P = 0.095A - 2.771$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.965 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละดินอยู่ในช่วงระหว่าง 12.36 ถึง 98.84 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 259.34 ถึง 1055.22 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 2.935P^{0.272}$ จะได้ $R^2=0.747$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 11.41 ถึง 102.00 กิโลกรัม และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.2 ถึง 10.01 กิโลปาสกาล

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเชิงเส้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-out Force กับ Estimated Surface area และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงถอน (Pull-out Force) กับ Cohesion Strength ของหญ้าแฝกที่ได้ดังต่อไปนี้ คือ

รูปแบบสี่เหลี่ยม

$P = 0.054A + 3.789$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.988 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละดินอยู่ในช่วงระหว่าง 12.36 ถึง 86.48 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 446.84 ถึง 1806.37 ตารางเซนติเมตร

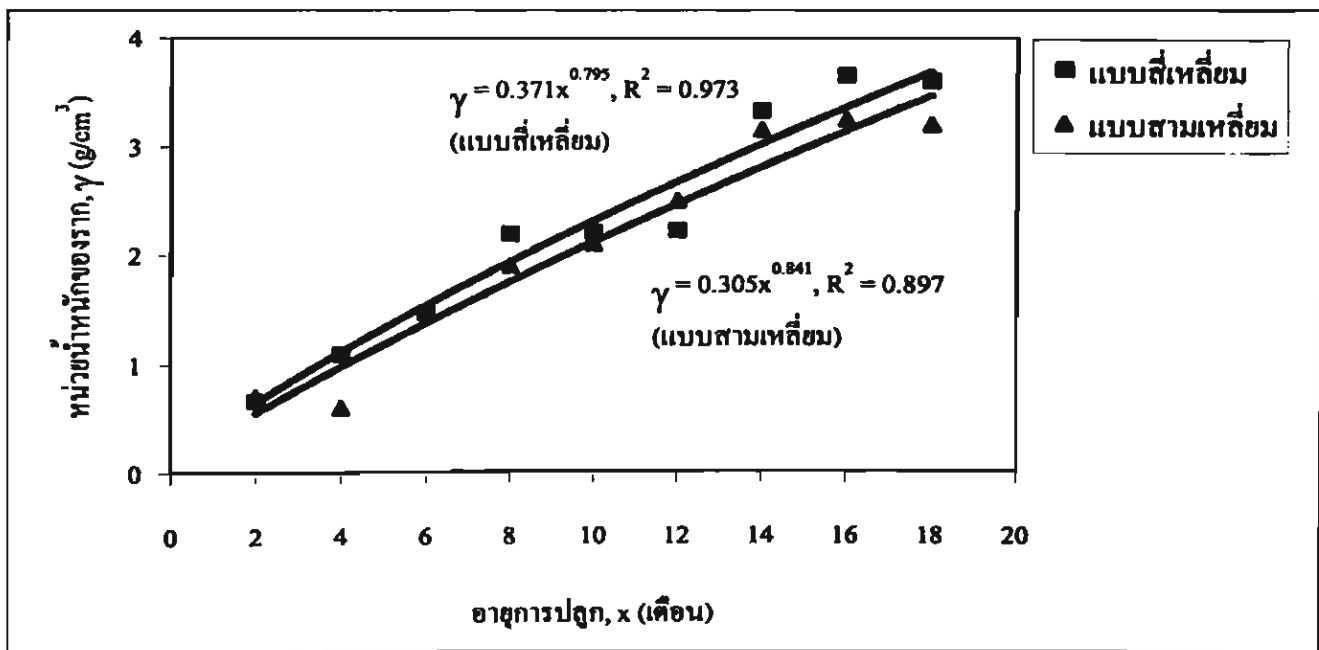
$c_r = 1.985P^{0.238}$ จะได้ $R^2=0.5077$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12.36 ถึง 125.00 kg และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.647 ถึง 5.59 กิโลปาสกาล

รูปแบบสามเหลี่ยม

$P = 0.052A - 2.976$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.969 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละดินอยู่ในช่วงระหว่าง 12.36 ถึง 86.40 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 446.84 ถึง 1806.27 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 1.342P^{0.340}$ จะได้ $R^2 = 0.772$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.09 ถึง 118.40 kg และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.44 ถึง 7.48 กิโลปาสกาล

ดังนั้นค่า Pull-out Force ของรูปแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่าสูงกว่าแบบสามเหลี่ยมที่ค่า Estimated Surface area เดียวกัน ค่า Pull-out Force มีแนวโน้มต่ำลงเมื่อ Estimated Surface area มีค่าน้อย และค่าของ Cohesion Strength จะแปรผันกับค่า Pull-out Force ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Operstien and Fryman [28] จากความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสามารถหาความสัมพันธ์เพิ่มเติมได้อีกด้วยนั่นก็คือความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักของราก กับอายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ดังในภาพที่ 4-63



ภาพที่ 4-63 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูก ในสนาม

จากภาพที่ 4-69 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ มีค่าดังต่อไปนี้

รูปแบบสี่เหลี่ยม

หน่วยน้ำหนักของรากมีค่า 0.66, 1.09, 1.47, 2.19, 2.20, 2.22, 3.32, 3.65 และ 3.60 กรัมต่อถูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูก คือ $\gamma = 0.371x^{0.795}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.973$

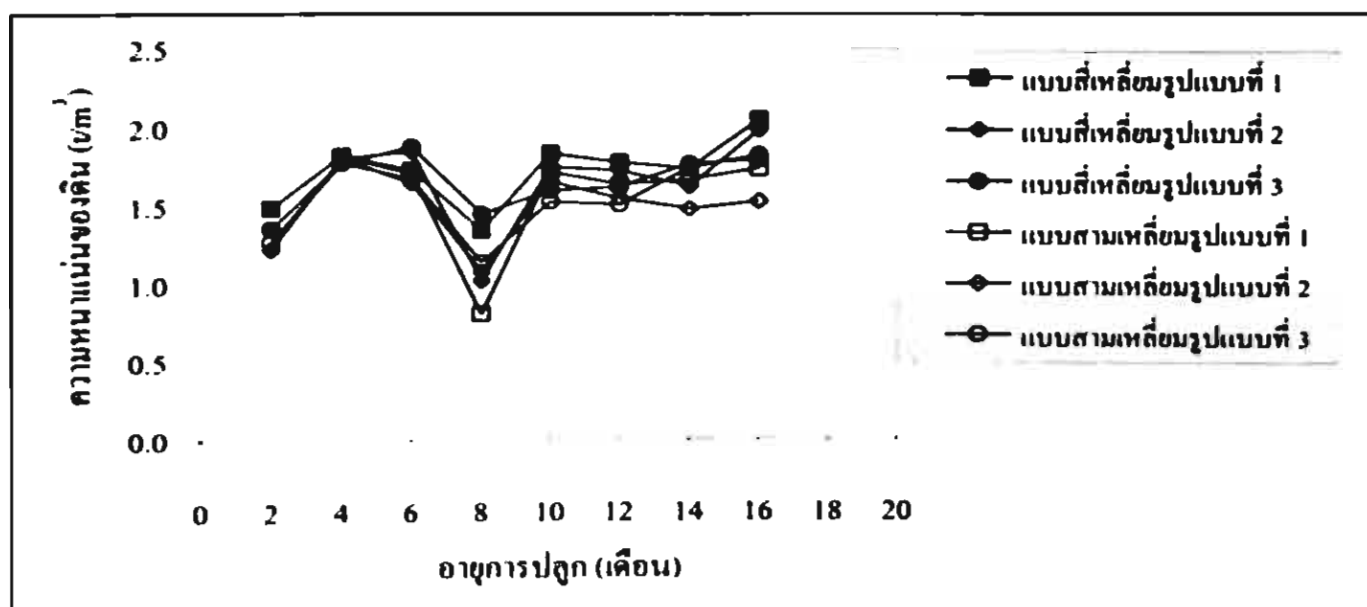
รูปแบบสามเหลี่ยม

หน่วยน้ำหนักของรากมีค่า 0.70, 0.60, 1.50, 1.90, 2.10, 2.50, 3.15, 3.25 และ 3.20 กรัมต่อถูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูก คือ $\gamma = 0.305x^{0.841}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.897$

ดังนั้นค่าหน่วยน้ำหนักของรากในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่าแบบสามเหลี่ยมเมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน และค่าหน่วยน้ำหนักของรากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น

4.6 ผลการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของดินในแต่ละรูปแบบการปลูกและที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4-64 และ 4-65 ตามลำดับดังนี้



ภาพที่ 4-64 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในสนามของดินทั้ง 3 รูปแบบ ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือน

จากภาพที่ 4-64 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในสนามของดินทั้ง 3 รูปแบบ ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม มีค่าดังต่อไปนี้

แบบสี่เหลี่ยม

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 1 ดังนี้ 1.492, 1.824, 1.737, 1.346, 1.838, 1.780, 1.740, และ 2.050
ต้นต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 2 ดังนี้ 1.226, 1.811, 1.853, 1.023, 1.752, 1.730, 1.624 และ 1.985
ต้นต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

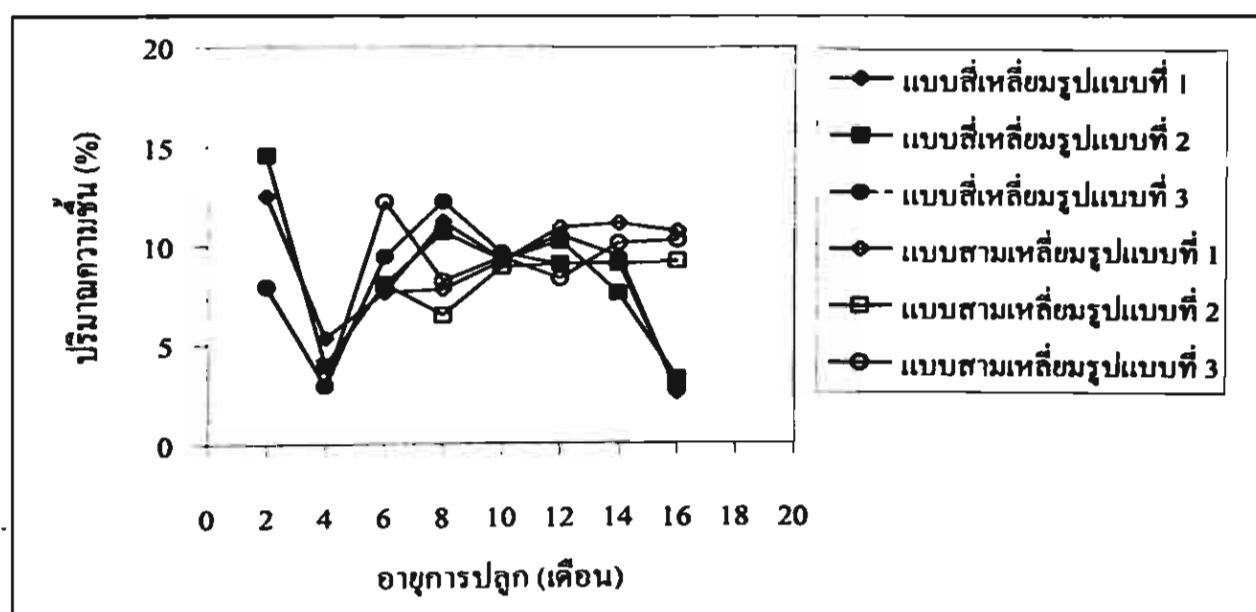
ความหนาแน่นรูปแบบที่ 3 ดังนี้ 1.356, 1.779, 1.881, 1.452, 1.600, 1.622, 1.770 และ 1.795
 ดันต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

แบบสามเหลี่ยม

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 1 ดังนี้ 1.492, 1.824, 1.710, 0.810, 1.720, 1.640, 1.670 และ 1.740
 ดันต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 2 ดังนี้ 1.226, 1.811, 1.650, 1.080, 1.660, 1.550, 1.482 และ 1.530
 ดันต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 3 ดังนี้ 1.272, 1.779, 1.680, 1.140, 1.530, 1.550, 1.746 และ 1.824
 ดันต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ



ภาพที่ 4-55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในสนามของดินทั้ง 3 รูปแบบ ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือน

จากภาพที่ 4-65 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในสนามของดินทั้ง 3 รูปแบบ ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม มีค่าดังต่อไปนี้

แบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 1 ดังนี้ 12.52, 5.34, 7.63, 11.20, 9.32, 11.51, 9.44 และ 2.56 % ตามลำดับ

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 2 ดังนี้ 14.58, 3.95, 8.05, 10.68, 9.26, 10.21, 7.56 และ 3.25 % ตามลำดับ

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 3 ดังนี้ 7.92, 2.93, 9.45, 12.23, 9.61, 9.05, 9.12 และ 2.74 % ตามลำดับ

แบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 1 ดังนี้ 12.52, 5.34, 7.63, 7.80, 9.20, 10.90, 11.10 และ 10.7 % ตามลำดับ

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 2 ดังนี้ 14.58, 3.95, 8.05, 6.50, 8.90, 9.08, 9.04 และ 9.20 % ตามลำดับ

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 3 ดังนี้ 7.92, 2.93, 12.23, 8.20, 9.40, 8.30, 10.10 และ 10.25 % ตามลำดับ

ดังนั้นความหนาแน่นของดินในสนามทั้ง 3 รูปแบบมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันแต่ทั้งนี้ ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน และความหนาแน่นของดินในสนามข้างแปลงทดลอง และบริเวณข้างคันกระถินเทพา มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันในกรณีที่มีการปลูกที่ความห่าง ต่างกันยังไม่ส่งผลอะไรกับความหนาแน่นมากนัก เพราะการเจริญเติบโตของคันกระถินและหญ้าแฝก ยังคงมีขนาดที่เล็กมาก แต่ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับค่าความชื้นในมวลดินเป็นสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินที่เสริมรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกด้วยระบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม สำหรับงานป้องกันลาดคันดินซึ่งสามารถสรุปออกมาดังต่อไปนี้

5.1.1 การเจริญเติบโตของต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนาม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของต้นกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.46 - 5.47 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 0.296e^{0.160x}$ โดยมีค่า $R^2=0.969$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.46 - 4.64 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 0.278e^{0.155x}$ โดยมีค่า $R^2=0.962$

ความสูงของต้นกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีความสูงอยู่ในช่วง 46.33 - 324 ซม. จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $h = 39.413e^{0.113x}$ โดยมีค่า $R^2=0.976$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีความสูงอยู่ในช่วง 36.33 - 292.67 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $h = 37.023e^{0.121x}$ โดยมีค่า $R^2=0.939$

รัศมีรากของกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ต้นกระถินเทพามีรัศมีรากอยู่ในช่วง 11.33 - 340 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $r = 8.177e^{0.208x}$ โดยมีค่า $R^2=0.985$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ดันกระถินเทพามีรัศมีรากอยู่ในช่วง 10.18 - 258.9 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $r = 8.031e^{0.198x}$ โดยมีค่า $R^2=0.982$

ความยาวของรากกระถินเทพาของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม ดันกระถินเทพามีขนาดความยาวของรากอยู่ในช่วง 9.16 - 152 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 6.048e^{0.181x}$ โดยมีค่า $R^2=0.987$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม ดันกระถินเทพามีขนาดความยาวของรากอยู่ในช่วง 4.16 - 132.8 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 3.289e^{0.222x}$ โดยมีค่า $R^2=0.967$

เส้นผ่านศูนย์กลางกอกหญาแผ่ของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม หญาแผ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอกหญาแผ่อยู่ในช่วง 2 - 11.89 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของหญาแผ่กับอายุการปลูก คือ $d = 1.678e^{0.106x}$ โดยมีค่า $R^2=0.982$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หญาแผ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกอกหญาแผ่อยู่ในช่วง 2.1 - 14.22 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของหญาแผ่กับอายุการปลูก คือ $d = 2.670e^{0.077x}$ โดยมีค่า $R^2=0.724$

ความสูงกอกหญาแผ่ของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม หญาแผ่มีความสูงกอกอยู่ในช่วง 54.85 - 162 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของหญาแผ่กับอายุการปลูก คือ $h = 48.450e^{0.076x}$ โดยมีค่า $R^2=0.885$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หญาแผ่มีความสูงกอกอยู่ในช่วง 32 - 205.5 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของหญาแผ่กับอายุการปลูก คือ $h = 30.658e^{0.119x}$ โดยมีค่า $R^2=0.916$

รัศมีรากหญาแผ่ของการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม หล้าแฝกมีรัศมีรากอยู่ในช่วง 19.67 - 62 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหล้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 19.402e^{0.062x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.941$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หล้าแฝกมีรัศมีรากอยู่ในช่วง 4.9 - 56.33 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหล้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 30.658e^{0.119x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.916$

ความยาวรากหล้าแฝกของการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและแบบสามเหลี่ยม ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม หล้าแฝกมีความยาวรากอยู่ในช่วง 10.33 - 42 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหล้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 10.456e^{0.076x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.941$

การปลูกแบบสามเหลี่ยม หล้าแฝกมีความยาวรากอยู่ในช่วง 5.33 - 31.75 เซนติเมตร จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหล้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 6.778e^{0.101x}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.838$

ดังนั้นจากการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นกระถินเทพาและกอหล้าแฝกในสนามของการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม พบว่า ที่อายุเพิ่มขึ้นการปลูกแบบสี่เหลี่ยมจะให้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของต้น ความกว้าง และความยาวของรากต้นกระถินเทพาและหล้าแฝกที่มีแนวโน้มสูงกว่าการปลูกแบบสามเหลี่ยม

การเจริญเติบโตของกระถินเทพาและหล้าแฝกในสนามความลาดชันของการปลูกที่ 30 องศา 4, 8, 12 และ 16 เดือนมีค่าดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 1.67 ถึง 6.6 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 0.433x^{0.966}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.994$

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.32 ถึง 4.33 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $d = 1.076x^{0.487}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.791$

ความสูงต้นของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 149 ถึง 420 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $h = 56.857x^{0.675}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.913$

ความสูงต้นของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 146 ถึง 275 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $h = 79.985x^{0.466}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.952$

รัศมีรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 80 ถึง 480 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $r = 3.125x^{1.754}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.948$

รัศมีรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 30 ถึง 320 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $r = 13.653x^{1.281}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.999$

ความยาวรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 40 ถึง 240 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 6.887x^{1.277}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.998$

ความยาวรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 15 ถึง 160 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของกระถินเทพากับอายุการปลูก คือ $L = 1.556x^{1.755}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.948$

เส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.3 ถึง 7.9 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $d = 0.575x^{0.930}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.926$

เส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.26 ถึง 12 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $d = 0.878x^{0.899}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.959$

ความสูงกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 92 ถึง 185 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $h = 46.957x^{0.515}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.965$

ความสูงต้นของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 101 ถึง 180 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความสูงต้นของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $h = 57.231x^{0.398}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.975$

รัศมีรากของกอหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 21 ถึง 38 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของกอหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 11.507x^{0.413}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.966$

รัศมีรากของหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 33 ถึง 59 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของรัศมีรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $r = 18.892x^{0.369}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.825$

ความยาวรากของหญ้าแฝกความลาดชันการปลูก 30 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12 ถึง 32 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 4.781x^{0.702}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.969$

ความยาวรากของกระถินเทพาความลาดชันการปลูก 45 องศา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 18 ถึง 35 เซนติเมตร ซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวรากของหญ้าแฝกกับอายุการปลูก คือ $L = 9.529x^{0.456}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.980$

ดังนั้นจากการศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกและกระถินเทพาในสนาม ทั้งการปลูกในแนวราบและในแนวลาดชันพบว่า การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกและกระถินเทพาที่ปลูกในแนวลาดชันจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าในแนวราบเพราะลักษณะดินในแนวลาดชันจะเป็นดินที่ซุยทำให้รากพืชได้รับสารอาหารและออกซิเจนที่เพียงพอในการเจริญเติบโต การเจริญเติบโตของกระถินเทพาที่ปลูกในแนวลาดชัน 30 องศาจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าแนวลาดชัน 45 องศา แต่การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกที่ปลูกในแนวลาดชัน 45 องศาจะมีการเจริญเติบโตดีกว่าแนวลาดชัน 30 องศา

5.1.2 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกในแปลง

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 1 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อายุการปลูกเดียวกัน โดยมีค่าพิสัยในช่วง 0.329 ถึง 0.653 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคัน โดยมีค่าพิสัยในช่วง 0.228 ถึง 0.423 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.275 ถึง 0.300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.175 ถึง 0.263 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังด้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่อายุการปลูกเดียวกัน โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.193 ถึง 0.619 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคัน โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.186 ถึง 0.769 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.180 ถึง 0.679 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.143 ถึง 0.357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นการทดสอบกำลังด้านการเฉือนทั้ง 3 แบบและดินเปล่าในรูปแบบการปลูกที่ 1 พบว่ากำลังด้านการเฉือนกลางคันกระถินเทพามีค่ามากกว่าหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา, หญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา และดินเปล่า เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน พบว่า ในช่วง 2 – 4 เดือนค่ากำลังด้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากของรูปแบบสามเหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยม แต่เมื่ออายุการปลูกมากกว่า 4 เดือนขึ้นไป ค่ากำลังด้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากของรูปแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม และในช่วง 6 เดือนแรก กำลังด้านทานการเฉือนของกลางคันกระถินเทพาจะใกล้เคียงกับ ระหว่างคันและระหว่างแถวของกระถินเทพา เนื่องจากอิทธิพลของรากกระถินเทพายังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ที่ทำให้กำลังด้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นในส่วนองหญ้าแฝกเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่ออายุการปลูกที่มากกว่า 8 เดือนรากกระถินเทพาเริ่มเข้ามามีอิทธิพลทำให้ระบบรากพืชแบบผสมผสานสมบูรณ์แบบส่งผลให้กำลังด้านทานการเฉือนที่กลางคันกระถินมีค่าสูงขึ้น

กำลังด้านทานการเฉือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 1 ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังด้านทานการเฉือนของทฤษฎีมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.248 - 1.415 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.277 - 0.510 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังด้านทานการเหือนของทฤษฎีมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.247 - 1.023 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.201 - 0.689 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นกำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนามซึ่งเป็นค่าไม่สูงมากถ้าเปรียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งอาจจะมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินมีผลต่อกำลังด้านทานการเหือนของการทดสอบในสนาม แต่ในทางทฤษฎีไม่นำเอาปริมาณความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วย ที่อายุการปลูก 4 เดือนขึ้นไปกำลังด้านทานการเหือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้พบว่ารากพืชสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเหือนได้มากเลยทีเดียว

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 2 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.314 ถึง 0.821 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกกระหว่างคันกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.347 ถึง 0.627 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกกระหว่างแถวกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.301 ถึง 0.352 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.175 ถึง 0.263 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากคันกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.170 ถึง 0.751 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกกระหว่างคันกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.164 ถึง 0.582 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังด้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกกระหว่างแถวกระถินเทพา มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.173 ถึง 0.575 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.143 ถึง 0.357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นการทดสอบกำลังต้านทานการเฉือนทั้ง 3 แบบและดินเปล่าในรูปแบบการปลูกที่ 2 พบว่ากำลังต้านทานการเฉือนกลางคันกระถินเทพามีค่ามากกว่าหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา, หญ้าแฝก ระหว่างคันกระถินเทพา และดินเปล่า เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน ค่ากำลังต้านทานการเฉือนของดินที่เสริมรากของรูปแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม และในช่วง 6 เดือนแรกกำลังต้านทานการเฉือนของกลางคันกระถินเทพาจะใกล้เคียงกับ ระหว่างคันกระถินเทพา เนื่องจากอิทธิพลของรากกระถินเทพายังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ที่ทำให้กำลังต้านทานแรงเฉือนที่ได้จะเป็นในส่วนหญ้าแฝกเป็นส่วนใหญ่ แต่ในเดือนที่ 4 กำลังต้านทานการเฉือนจะสูงมากอาจจะเป็นเพราะหลุมทดสอบมีก้อนลูกรังทำให้กำลังต้านทานการเฉือนสูงมาก แต่เมื่ออายุการปลูกที่มากกว่า 8 เดือนรากกระถินเทพาเริ่มเข้ามามีอิทธิพล ทำให้ระบบรากพืชแบบผสมผสานสมบูรณ์แบบส่งผลให้กำลังต้านทานการเฉือนที่กลางคันกระถินเทพามีค่าสูงขึ้น ส่วนกำลังต้านทานการเฉือนระหว่างแถวจะมีค่าไม่สูงนักเมื่อเทียบกับระหว่างคันกระถินเทพาและกลางคันกระถินเทพา แต่เมื่อเทียบกับดินเปล่าจะมีค่ามากกว่าดินเปล่า

กำลังต้านทานการเฉือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 2 ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังต้านทานการเฉือนของทฤษฎีมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.355 - 1.236 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามมีค่าดังนี้ 0.201 - 0.627 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังต้านทานการเฉือนของทฤษฎีมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.227 - 0.799 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.190 - 0.568 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นกำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามซึ่งเป็นค่าไม่สูงมากถ้าเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีซึ่งอาจจะมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินมีผลต่อกำลังต้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนาม แต่ในทางทฤษฎีไม่นำเอาปริมาณความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วย ที่อายุการ

ปลูกเดียวกัน ค่ากำลังต้านทานการเหือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้พบว่ารากพืชสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเหือนได้มากเลยทีเดียว

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางดิน ระหว่างต้น ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 3 มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น

กำลังความต้านทานแรงเหือนของกลางต้นกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.410 ถึง 0.653 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพามีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.290 ถึง 0.274 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพามีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.270 ถึง 0.289 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.175 ถึง 0.263 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝก มีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.226 ถึง 0.421 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพามีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.205 ถึง 0.550 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพามีอัตราการเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.221 ถึง 0.360 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเหือนของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.143 ถึง 0.357 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้น กำลังด้านการเหือนกลางต้นกระถินเทพามีค่ามากกว่าหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา, หญ้าแฝกระหว่างต้นกระถินเทพา และดินเปล่า เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน ในช่วง 6 เดือนแรก กำลังต้านทานการเหือนของกลางต้นกระถินเทพาจะใกล้เคียงกับ ระหว่างต้นกระถินเทพา เนื่องจากอิทธิพลของรากกระถินเทพายังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ ทำให้กำลังต้านทานแรงเหือน

ที่ได้จะเป็นในส่วนของหญ้าแฝกเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่ออายุการปลูกที่มากกว่า 8 เดือนรากกระดิน เทพาเริ่มเข้ามามีอิทธิพล ทำให้ระบบรากพืชแบบผสมผสานสมบูรณ์แบบส่งผลให้กำลังด้านทาน การเฉือนที่กลางต้นกระดินเทพามีค่าสูงขึ้น ส่วนกำลังด้านทานการเฉือนระหว่างแถวจะมีค่าไม่สูง นักเมื่อเทียบกับระหว่างต้นกระดินเทพาและกลางต้นกระดินเทพา แต่เมื่อเทียบกับดินเปล่าจะมีค่า มากกว่าดินเปล่า แต่ที่น่าสังเกตพบว่าเป็นเดือนที่ 18 กำลังด้านแรงเฉือนลดลงเนื่องจากก่อนการ ทดสอบมีการเกิดไฟไหม้กับต้นกระดินเทพาและหญ้าแฝก จึงส่งผลให้กำลังด้านทานแรงของพืช ลดลง

กำลังด้านทานการเฉือนของทฤษฎี และทดสอบในสนามอายุการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และ แบบสามเหลี่ยมของรูปแบบที่ 3 ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

กำลังด้านทานการเฉือนของทฤษฎีมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.292 - 1.278 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร

กำลังด้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.251 - 0.563 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

กำลังด้านทานการเฉือนของทฤษฎีมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.306 - 0.941 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร

กำลังด้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.218 - 0.440 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้นกำลังด้านทานการเฉือนของการทดสอบในสนามซึ่งเป็นค่าไม่สูงมากถ้าเปรียบกับค่า ทางทฤษฎีซึ่งอาจจะมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินมีผลต่อกำลังด้านทานการเฉือนของ การทดสอบในสนาม แต่ในทางทฤษฎีไม่นำเอาปริมาณความชื้นมาเกี่ยวข้องด้วย ที่อายุการ ปลูกเดียวกัน ค่ากำลังด้านทานการเฉือนของทางทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่ เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งทำให้พบว่ารากพืชสามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนได้มาก เลขที่เดียว

เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน พบว่า ส่วนมากค่ากำลังด้านทานการเฉือนของทาง ทฤษฎี และการทดสอบในสนามของรูปแบบสี่เหลี่ยมมีค่ามากกว่ารูปแบบสามเหลี่ยมของทั้งสาม รูปแบบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารากพืชมีบทบาทในการเสริมแรงให้กับดินได้มากพอสมควรตามอายุการ ปลูกที่เพิ่มขึ้น

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 1 มีค่าแปรเปลี่ยนตามธรรมชาติตามฤดูกาล ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.80 ถึง 19.21 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.98 ถึง 20.93 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.71 ถึง 21.47 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.24 ถึง 18.63 เปอร์เซ็นต์

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.60 ถึง 26.50 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.80 ถึง 21.50 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 1.30 ถึง 23.50 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 1.60 ถึง 25.70 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 2 มีค่าแปรเปลี่ยนตามธรรมชาติตามฤดูกาล ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.39 ถึง 22.23 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.48 ถึง 20.92 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.67 ถึง 19.96 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.89 ถึง 18.21 เปอร์เซ็นต์

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.00 ถึง 22.30 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.30 ถึง 28.30 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.37 ถึง 19.96 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 9.63 ถึง 20.55 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากกระถินเทพาและหญ้าแฝกที่การปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม ทดสอบที่กลางคัน ระหว่างคัน ระหว่างแถว และดินเปล่า รูปแบบที่ 3 มีค่าแปรเปลี่ยนตามธรรมชาติตามฤดูกาล ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าดังนี้

การปลูกแบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 3.54 ถึง 19.54 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 6.14 ถึง 17.36 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.29 ถึง 17.96 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.43 ถึง 16.53 เปอร์เซ็นต์

การปลูกแบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินกลางคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.40 ถึง 19.27 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกระหว่างคันกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.63 ถึง 20.79 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินที่เสริมด้วยรากหญ้าแฝกแถวกระถินเทพา โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 7.40 ถึง 20.79 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณความชื้นของดินเปล่า โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 8.90 ถึง 21.33 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น ค่ากำลังด้านทานแรงเฉือนของดินอาจจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเจริญเติบโตของคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกเมื่อพิจารณาในความชื้นที่ใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาในความชื้นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งจะแปรปรวนตามฤดูที่แตกต่างกันทำให้กำลังด้านทานการเฉือนไม่มี

แนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการปลูกเนื่องจากปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน อย่างเช่นในช่วงอายุ 4 เดือน ค่าความต้านทานแรงเฉือนจะสูงขึ้นซึ่งเป็นผลเนื่องจาก ปริมาณความชื้นที่มีแนวโน้มต่ำและในหลุมทดสอบมีลูกรัง และจะลดลงอีกครั้งในเดือนที่ 6 เนื่องจากปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นอีกครั้งและจะลดลงอีกครั้งในเดือนที่ 10 เนื่องจากปริมาณความชื้นเพิ่มสูงขึ้น

ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยของรูปแบบที่ 1 ทั้งแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกมาในรูปสมการดังนี้ คือ $S_r = -0.016w + 0.578$ ($R^2 = 0.593$) และ $S_r = -0.017w + 0.547$ ($R^2 = 0.795$) ตามลำดับ

ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยของรูปแบบที่ 2 ทั้งแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกมาในรูปสมการดังนี้ คือ $S_r = -0.030w + 0.935$ ($R^2 = 0.552$) และ $S_r = -0.031w + 0.963$ ($R^2 = 0.787$) ตามลำดับ

ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อยของรูปแบบที่ 3 ทั้งแบบสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงออกมาในรูปสมการดังนี้ คือ $S_r = -0.019w + 0.674$ ($R^2 = 0.721$) และ $S_r = -0.017w + 0.605$ ($R^2 = 0.887$) ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมรากกระถินเทพา และหญ้าแฝก ที่ปลูกในแนวเอียงลาด 30 และ 45 องศา กับอายุการปลูกในสนามที่อายุ 4, 8, 12 และ 16 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

แนวเอียงลาด 30 องศา

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของกลางต้น กระถินเทพากลางต้นกระถินเทพามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.183 ถึง 0.251 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่าง กระถินเทพา มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.187 ถึง 0.2188 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่างแถว คัด มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.163 ถึง 0.197 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

แนวเอียงลาด 45 องศา

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของกลางต้น กระถินมีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.181 ถึง 0.281 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่าง กระถินเทพามีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.153 ถึง 0.225 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เสริมด้วยรากต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกของระหว่างแถว มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 0.160 ถึง 0.178 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ค่าความต้านทานแรงเฉือนมีค่ามากเมื่อมีปริมาณความชื้นในมวลดินน้อย และได้สมการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นกำลังต้านทานการเฉือนของดินที่ความลาดชันของการปลูก 30 องศา และ 45 องศา คือ $Sr = -0.011w + 0.318$ ($R^2 = 0.463$) และ $Sr = -0.015w + 0.357$ ($R^2 = 0.708$) ตามลำดับ

ดังนั้นจากการทดสอบการต้านทานการเฉือนของดินในสนาม ความลาดชันของการปลูก 30 องศา ลักษณะดินเป็นดินลูกรังเม็ดเล็กการยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินมีค่าต่ำกว่าทำให้การต้านทานการเฉือนของดินมีค่าลดลงปริมาณความชื้นในดินมีผลกระทบต่อความต้านทานการเฉือนน้อยมาก

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยม มีค่าเพิ่มขึ้นที่อายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น และแต่ละรูปแบบมีค่าพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินตามอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือนตามลำดับ ซึ่งมีค่าดังนี้

รูปแบบการปลูกที่ 1

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม มีค่า 0.020, 0.051, 0.063, 0.125, 0.194, 0.219, 0.286, 0.314 และ 0.502 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.022e^{0.182x}$ จะได้ $R^2 = 0.938$

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสามเหลี่ยม มีค่า 0.020, 0.051, 0.062, 0.086, 0.168, 0.217, 0.256, 0.264 และ 0.310 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.023e^{0.163x}$ จะได้ $R^2 = 0.914$

รูปแบบการปลูกที่ 2

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม มีค่า 0.064, 0.045, 0.117, 0.118, 0.194, 0.207, 0.218, 0.286 และ 0.429 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.043e^{0.125x}$ จะได้ $R^2 = 0.904$

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสามเหลี่ยม มีค่า 0.012, 0.040, 0.102, 0.104, 0.180, 0.194, 0.223, 0.233 และ 0.250 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.021e^{0.164x}$ จะได้ $R^2 = 0.779$

รูปแบบการปลูกที่ 3

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสี่เหลี่ยม มีค่า 0.038, 0.045, 0.100, 0.167, 0.152, 0.208, 0.217, 0.236 และ 0.446 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.035e^{0.138x}$ จะได้ $R^2 = 0.901$

พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบการสามเหลี่ยม มีค่า 0.044, 0.044, 0.104, 0.146, 0.150, 0.193, 0.218, 0.256 และ 0.308 % ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $a_r = 0.039e^{0.123x}$ จะได้ $R^2 = 0.906$

ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการปลูกแต่กำลังด้านทานแรงเฉือนที่มีแนวโน้มสูงขึ้นหรือลดลงมีสาเหตุมาจากปริมาณความชื้นในดินนั้นสูงทำให้กำลังด้านทานแรงเฉือนลดลง ผลการทดสอบทางทฤษฎีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณรากที่เพิ่มขึ้นตามอายุการปลูก แต่ผลการทดสอบในสนามได้ที่แตกต่างกันจากทฤษฎี ซึ่งมีผลมาจากปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันไปในแต่ละเดือน ทำให้ค่าแรงเฉือนที่จากการทดสอบในสนามไม่ขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตของรากเพียงอย่างเดียวแต่ขึ้นอยู่สภาพสิ่งแวดล้อมด้วย พื้นที่หน้าตัดรากต่อพื้นที่หน้าตัดดินของรูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบมีค่าสูงกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบ ซึ่งแสดงความหมายเป็นนัยว่า ถ้าที่ปริมาณความชื้น และอายุการปลูกเดียวกัน ค่ากำลังด้านทานแรงเฉือนของรูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบจะมีค่าสูงกว่ารูปแบบสี่เหลี่ยมทั้งสามรูปแบบตามไปด้วย

5.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงดินกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนาม

ความสัมพันธ์ การยืด Tensile Strain สูงสุด กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพาในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม วิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยได้ดังนี้ คือ $\varepsilon = 24.087d + 12.835$ ($R^2=0.743$) และ $\varepsilon = 60.126d + 1.711$ ($R^2=0.862$) ตามลำดับ และ Tensile Strain มีแนวโน้มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชที่เพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ การยืด Tensile Strain สูงสุด กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมวิเคราะห์โดยใช้สมการถดถอยได้ดังนี้คือ $\varepsilon = 62.190d + 10.055$ ($R^2=0.677$) และ $\varepsilon = 259.701d - 11.752$ ($R^2=0.682$) ตามลำดับ และ Tensile Strain มีแนวโน้มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพืชที่เพิ่มขึ้น

ค่าแรงดึงของรากกระถินเทพามีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพามีขนาดใหญ่ขึ้น จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินกระถินเทพาได้คือ $T_R = 30.407d^{1.153}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.925$ และค่าของแรงดึงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 1.1 ถึง 58 กิโลกรัม โดยที่รากของดินกระถินเทพามีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.08 ถึง 1.57 เซนติเมตร

ค่าแรงดึงของรากหญ้าแฝกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกมีขนาดใหญ่ขึ้นและจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากดินหญ้าแฝกได้คือ $T_R = 7.803d^{1.153}$ โดยมีค่าของ $R^2 =$

0.773 และค่าของแรงดึงมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5 ถึง 1.92 กิโลกรัม โดยที่รากของหญ้าแฝกมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.03 ถึง 0.2 เซนติเมตร

ค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของรากต้นกระถินเทพามีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นกระถินเทพามีขนาดใหญ่ขึ้น จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากต้นกระถินเทพาได้ คือ $\sigma_t = 9.387d^{-1.129}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.774$ กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 49 ถึง 315 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่รากของต้นกระถินเทพามีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.20 เซนติเมตร

ค่ากำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของรากหญ้าแฝกมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝกมีขนาดใหญ่ขึ้น และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการที่มีความสัมพันธ์ของกำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากหญ้าแฝก คือ $\sigma_t = 42.480 d^{-0.652}$ โดยมีค่าของ $R^2 = 0.615$ กำลังต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 19 ถึง 407 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยที่รากของหญ้าแฝกมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.02 ถึง 0.20 เซนติเมตร

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีขนาดเพิ่มสูงขึ้น และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากได้คือ $E_r = 183.360d^{-1.189}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.724$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 147.15 ถึง 588.00 MPa โดยที่รากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.353 ถึง 1.093 มิลลิเมตร

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากจะแปรผันเพิ่มสูงขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากที่มีขนาดเล็กลงและจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการเส้นถดถอยสามารถหาสมการความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากได้คือ $E_r = 13.047d^{-1.113}$ โดยที่มีค่า $R^2 = 0.730$ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 85 ถึง 588 MPa โดยที่รากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04 ถึง 0.14 เซนติเมตร

5.1.4 ผลการทดสอบแรงถอนคิ่งต้นกระถินเทพาและกอหญ้าแฝกในสนาม

การทดสอบแรงถอนคิ่งต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนาม กำลังต้านทานแรงถอนคิ่งจะอาศัยแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวที่ของรากกับดินกับกำลังต้านทานการคิ่งของราก โดยจะขึ้นอยู่กับ การเจริญเติบโตของรากที่ยึดเกาะอยู่กับอนุภาคของดิน และปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดิน และเมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน แรงถอนคิ่งของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามาก

กว่ารูปแบบสามเหลี่ยม ซึ่งมีปริมาณความชื้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาที่ปริมาณความชื้นเดียวกันตลอดอายุการปลูกก็จะพบว่าแรงถอนดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนดินกับอายุการปลูกในแต่ละเดือนและผลกระทบเนื่องจากปริมาณความชื้นในดินขณะทดสอบที่ปลูกในแนวเฉียงลาดโดยที่อายุการทดสอบ 4, 8, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ดังนี้

ความลาดเอียง 30 องศา แรงถอนดินของรากกระถินเทพาในสนาม มีค่าอยู่ระหว่าง 105 - 220 กิโลกรัม และความลาดเอียง 45 องศา แรงถอนดินของรากกระถินเทพาในสนาม มีค่าอยู่ระหว่าง 93 - 192 กิโลกรัม ดังนั้น ค่าแรงถอนดินของต้นกระถินเทพา และกอหญ้าแฝกที่ความลาดชัน 30 องศา จะมีค่ามากกว่าความลาดชัน 45 องศาที่อายุการปลูกเดียวกัน และค่าแรงถอนดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้นเมื่อไม่พิจารณาปริมาณความชื้น

ค่า Pull-out Force มีแนวโน้มค่าลงเมื่อ Estimated Surface area มีค่ามากขึ้น และค่าของ Cohesion Strength จะแปรผกผันกับค่า Pull-out Force ถ้า Pull-out Force มีค่ามาก ค่าของ Cohesion Strength ก็จะมากตามไปด้วย และจากความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-out Force กับ Estimated Surface area และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงถอน (Pull-out Force) กับ Cohesion Strength ของต้นกระถินเทพาที่ได้ดังต่อไปนี้ คือ

รูปแบบสี่เหลี่ยม

$P = 0.100A - 5.056$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.977 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 13.32 ถึง 86.48 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 259.39 ถึง 1052.15 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 2.471P^{0.3151}$ จะได้ $R^2=0.694$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12.355 ถึง 113 กิโลกรัม และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 4.67 ถึง 10.1 กิโลปาสกาล

รูปแบบสามเหลี่ยม

$P = 0.095A - 2.771$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.965 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละต้นอยู่ในช่วงระหว่าง 12.36 ถึง 98.84 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 259.34 ถึง 1055.22 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 2.935P^{0.272}$ จะได้ $R^2=0.747$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 11.41 ถึง 102.00 กิโลกรัม และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 5.2 ถึง 10.01 กิโลปาสกาล

จากความสัมพันธ์ระหว่าง Pull-out Force กับ Estimated Surface area และ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงถอน (Pull-out Force) กับ Cohesion Strength ของหญ้าแฝกที่ได้ดังต่อไปนี้ คือ

รูปแบบสี่เหลี่ยม

$P = 0.054A + 3.789$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.988 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละคืนอยู่ในช่วงระหว่าง 12.36 ถึง 86.48 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 446.84 ถึง 1806.37 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 1.985P^{0.238}$ จะได้ $R^2 = 0.5077$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 12.36 ถึง 125.00 kg และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.647 ถึง 5.59 กิโลปาสกาล

รูปแบบสามเหลี่ยม

$P = 0.052A - 2.976$ โดยที่มีค่า R^2 เท่ากับ 0.969 และ Pull-out Force มีค่าพิสัยของแต่ละคืนอยู่ในช่วงระหว่าง 12.36 ถึง 86.40 กิโลกรัม โดยที่รากมีพื้นผิวสัมผัสอยู่ในช่วงระหว่าง 446.84 ถึง 1806.27 ตารางเซนติเมตร

$c_r = 1.342P^{0.340}$ จะได้ $R^2 = 0.772$ ค่า Pull-out Force มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 10.09 ถึง 118.40 kg และค่า Cohesion Strength มีค่าพิสัยอยู่ในช่วง 2.44 ถึง 7.48 กิโลปาสกาล

ดังนั้นค่า Pull-out Force ของรูปแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่าสูงกว่าแบบสามเหลี่ยมที่ค่า Estimated Surface area เดียวกัน ค่า Pull-out Force มีแนวโน้มต่ำลงเมื่อ Estimated Surface area มีค่าน้อย และค่าของ Cohesion Strength จะแปรผันกับค่า Pull-out Force

หน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูกที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 เดือน ตามลำดับ มีค่าดังต่อไปนี้

รูปแบบสี่เหลี่ยม

หน่วยน้ำหนักของรากมีค่าอยู่ระหว่าง 0.66 - 3.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูก คือ $\gamma = 0.371x^{0.795}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.973$

รูปแบบสามเหลี่ยม

หน่วยน้ำหนักของรากมีค่าอยู่ระหว่าง 0.60 - 3.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับซึ่งวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้สมการถดถอยสามารถหาความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักของรากกับอายุการปลูก คือ $\gamma = 0.305x^{0.841}$ โดยมีค่า $R^2 = 0.897$

ดังนั้นค่าหน่วยน้ำหนักของรากในรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยมจะมีค่ามากกว่าแบบสามเหลี่ยมเมื่อเปรียบเทียบที่อายุการปลูกเดียวกัน และค่าหน่วยน้ำหนักของรากจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุการปลูกที่เพิ่มขึ้น

4.5.5 ผลการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม

จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นในสนามของดินทั้ง 3 รูปแบบที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยมมีค่าดังต่อไปนี้

แบบสี่เหลี่ยม

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.346 - 2.050 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.023 - 1.985 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.356 - 1.881 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

แบบสามเหลี่ยม

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.810 - 1.824 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.080 - 1.811 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

ความหนาแน่นรูปแบบที่ 3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.140 - 1.824 ดันต่อลูกบาศก์เมตร

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในสนามของดินทั้ง 3 รูปแบบ ที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 เดือนตามลำดับ ของรูปแบบการปลูกแบบสี่เหลี่ยม และแบบสามเหลี่ยม มีค่าดังต่อไปนี้

แบบสี่เหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 2.56 - 12.52 %

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 3.25 - 14.58 %

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 3 มีค่าอยู่ระหว่าง 2.74 - 12.23 %

แบบสามเหลี่ยม

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 5.34 - 12.52 %

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 3.95 - 14.58 %

ปริมาณความชื้นของดินรูปแบบการปลูกที่ 3 มีค่าอยู่ระหว่าง 2.93 - 12.23 %

ดังนั้นความหนาแน่นของดินในสนามทั้ง 3 รูปแบบมีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันแต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน และความหนาแน่นของดินในสนามข้างแปลงทดลองและบริเวณข้างคันกระถินเทพา มีค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันในกรณีที่มีการปลูกที่ความห่างต่างกันยังไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นมากนัก เพราะการเจริญเติบโตของต้นกระถินและหญ้าแฝกยังคงมีขนาดเล็กมาก แต่ทั้งนี้จะต้องขึ้นอยู่กับค่าความชื้นในมวลดินเป็นสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาการเสริมกำลังของดินด้วยคันกระถินเทพาและหญ้าแฝกกับดินที่มีสภาพเสื่อมโทรมอื่นๆ ที่เป็นดินประเภทเดียวกันตลอดความลึกที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้ออกแบบระบบป้องกันพังทลายดินในอนาคต

5.2.2 ควรมีการศึกษาข้อมูลการรับแรงเฉือน และแรงถอนดึงในสนามที่อายุมากกว่า 6 เดือน หรืออาจจะถึง 2 ถึง 3 ปี เพื่อนำค่าที่มีผลต่อระยะห่างมาสรุปผลได้ชัดเจนมากขึ้น

5.2.3 ควรมีการปรับปรุงเครื่องมือให้มีความละเอียดให้สอดคล้องกับงานมากขึ้นทั้งการดึง และการเฉือน เพื่อที่จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้นและสามารถนำข้อมูลมาสรุปได้

5.2.4 ข้อมูลที่นำเสนอใน ภาคนิพนธ์ นี้เป็นข้อมูลเฉพาะกรณีการศึกษา กรณีที่นำไปประยุกต์ใช้งานควรพิจารณาถึงชนิดของข้อมูล และลักษณะของดินประกอบด้วย

5.2.5 การทดสอบแรงเฉือนและแรงถอนดึงของรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกในสนาม ตัวอย่างของคันไม้ที่ทดสอบในอายุการปลูกแต่ละเดือนควรมีขนาดความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคันใกล้เคียงกัน และควรทดสอบหลายๆ ตัวอย่าง

5.2.6 ควรน่าจะมีการทดสอบแรงเฉือนในพื้นที่ที่มีการลาดชันมีปัญหาการพังทลายของดิน เช่นในตลิ่งของร่องน้ำ ในลักษณะดินที่แตกต่างกัน

5.2.7 ควรมีการศึกษาข้อมูลการรับแรงเฉือนของดินในพื้นที่แห้งแล้งมีลักษณะดินเป็นดินร่วนปนทราย เช่นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

เอกสารอ้างอิง

1. กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ความรู้เรื่องหญ้าแฝก. กรุงเทพมหานคร : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2541. 115 หน้า.
2. คิติ์ แห่งชาวนิช. "Vetiver Grass for Slope Stabilization and Erosion Control," in Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin, No. 1998/2, 1998. pp. 4-16.
3. วราธร แก้วแสง; วิชัย สังวรปทานสกุล ; พานิช วุฒิพิฤกษ์. "กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเสริมด้วยรากหญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ประจวบคีรีขันธ์." อยู่ในการประชุมโยธาแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร. 2544.
4. สุเมธ วัฒนธรรม และ ปรีชา โพธิ์ปาน. "การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโต ระบบรากและมวลชีวภาพของหญ้าแฝกในดินชุดมาบบอน (กลุ่มดินที่ 35) เอกสารวิชาการ ศูนย์การศึกษาพัฒนาเขาหินซ้อนอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2538.
5. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (สำนักงาน กปร.). "หญ้าแฝกคืออะไร." สารานุกรมเรื่องหญ้าแฝก. กรุงเทพมหานคร : รุ่งเพชรการพิมพ์, 2541. 13 หน้า.
6. _____. "การใช้หญ้าแฝกในพื้นที่เกษตร." สารานุกรมเรื่องหญ้าแฝก. กรุงเทพมหานคร : รุ่งเพชรการพิมพ์, 2542. 13 หน้า.
7. ธนาคารโลก. หญ้าแฝก Vetiver grass แนวริ้วเพื่อป้องกันการพังทลาย. แปลโดย สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2540. 63 หน้า.
8. สมศรี บุญเรือง. ; อานาจจันทร์ครุฑ; วิไลภรณ์ ชนกนาคชัย; กระดินเทพา. (online) Available from [Http://www.doae.go.th/library/html/detail/kratin](http://www.doae.go.th/library/html/detail/kratin).
9. ประสิทธิ์ ผลวิไล และ สัญญา สราภิรมย์. "ประมาณอัตราการชะล้างพังทลายของดินในพื้นที่ลุ่ม น้ำยม อำเภอ สอง จังหวัดแพร่ บริเวณที่ตั้งแก่งเสือเต้นและสถานการณ์การตกตะกอนในแม่น้ำยม". เอกสารประชุมวิชาการ กรมพัฒนาที่ดิน สมาคมอนุรักษ์ดินและน้ำแห่งประเทศไทย, 2544 : 43.
10. Abramson L.W. ; Lee T.H. ; Sunil Sharma ; and Boyce G.M. . Slope Stability and Stabilization Methods. Canada : John Wiley & Sons, Inc. , 1996.

11. Bardet J.P.. Experimental Soil Mechanics., New Jersey : Prentice Hall Inc., 1977.
421-427.
12. Barker, D.H.. "Enhancement of Slope Stability by Vegetation." Ground Engineering.
April, 1986 : 11-15.
13. Broms, B.B.. "Lateral resistance of piles in cohesive soils." Journal of the Soil
Mechanics and Foundations Division. ASCE 90 (SM2)(1964) : 27 – 63.
14. Burrough, E.R. and Thomas, R.R.. Root Strength of Douglas fir as a factor in Slope
Stability. USAD Forest Services Review, Draft, INT, 1976,1600-1612.
15. Burrough, E.R. and Thomas, R.R.. Decling root strength in Douglas-fir after felling as a
factor in slope stability. United State Department of Agriculture, Forest Services,
Intermountain forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, Research Paper
INT-190. 1977.
16. Coppin, N.J. and Richard, I.G.. Use of vegetation in civil engineering. Butterworths,
London : 1990.
17. Endo, T. and Tsuruta, T.. "The effect of tree roots upon the shearing strength of soil."
Annual Report of the Hokkaido Branch of the Tokyo Forest Experiment Station 18
(1969) : 168 – 179.
18. Gray D.H.. "Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soils and Stability Slope."
Symposium on Soils Reinforcing and Stabilizing Techniques. Sydney, Australia :
1978, 253-306.
19. Gray D.H. and Sotir R.B. . Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stability : a
practical guide for erosion control. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1995. 378 p.
20. Gray, D.H. and Leiser, A.T. . Biotechnical Slope Protection and Erosion Control. New
York : Van Nostrand Reinhold Co., 1982. 271pp.
21. Greenway, D.R.. Vegatation and slope stability. In : Slope Stability. Edited by M.F.
Anderson and K.S. Richards. New York, Wiley.
22. Hathaway, R.L. and Penny, D.. "Root strength in some Populus and Salix clones." New
Zealand Journal of Botany 13 (1975) : 333 – 344.

23. Kassif, G. and Lopelovitz, A.. Strength properties of soil root systems. Soil and Road Lab, Faculty of Civil Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel. 1968.
24. Kual, R.. "The influence of roots on certain mechanical properties of an uncompacted soil." Ph.D. thesis. Department of Agricultural Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC. 1965.
25. Lambe, T.W.. Soil Testing for Engineers. New York, John Wiley & Sons : 1951. 88 - 97.
26. Manbeian, T.. The influence of Soil Moisture Suction, Cyclic Wetting and Drying, and Plant Roots on The Shear Strength of Cohesive Soil, Doctoral of Engineering Thesis, Geotechnical Engineering Program, University of Berkeley, 1973, 207 p.
27. Morgan, R.P.C.. Soil Erosion and Conservation, Chapter 8, 1986.
28. Operstein, V. and Frydman, S.. "The Influence of Vegetation on Soil Strength." Ground Improvement 4 No.2 (2000) : 81-89.
29. O'Loughlin, C.L.. "A study of tree root strength deterioration following clear felling." Canadian Journal of forest Research 4 (1974) : 107 – 113.
30. Poulos, H.G. and Davis, E.H.. Pile foundation and Analysis. New York : John Wiley & Sons, 1980.
31. Schiechtl, H.M.. Bioengineering for Land Reclamation and Conservation. Edmonton, Canada, University of Alberta Press: 1980. 404 pp.
32. Turmanina, V.I.. "The Strength of Tree Roots." Bullertin of the Moscow Society of Naturalists, Biological Section 70 (1965) : 36-45.
33. Tsukamoto, Y. and Kusuba, O.. Vegetative influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan. Proceeding, Symposium on Effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability, Environment Policy Institute. Honolulu, Hawaii : 1984.
34. Waldron L.J. . "Shear Resistance of Root-Permeated Homogenous and Stratified Soil." Soil Science Society of America Journal 41 (1977) : 843-849.
35. Waldron L.J. and Dakessian S. . "Soil Reinforcement By Roots : calculation of increased soil shear resistance from root properties." Soil Science 132 No.6 (1981) : 427-435.

36. Waldron L.J. and Dakessian S. . "Effect of Grass, Legume, and Tree Roots on Soil Shearing Resistance." Soil Science Society of America Journal 46 (1982) : 894-899.
37. Wilde S.A.. Forest Soil : Their Protection and Relation to Silviculture. New York : Ronald Press, 1958, 537 p.
38. Wiseman, G.. "A Study of Pull-out Resistance of Geomech." Soils and Road Laboratory, Technion, Israel, Final Report to Yehuda Welded Mesh Ltd. 1993.
39. Wischmeier, W.H. Cropland Erosion and Sedimentation, Departament of Agricultura Estados Unidos (USDA), 1976.
40. Wu T.H.. Investigation of landslide on Prince of Wale Island, Alaska. Geotechnical Engineering Report No.5, Department of Civil Engineering, Ohio State University, Columbus OH : 1976, 94 p.
41. Wu T.H.. "Slope Stabilization." In Slope stabilization and erosion control : a bioengineering approach. Edited by R.P.C. Morgan and R.J. Rickson. London : E & FN Spon, 1995, 221 – 264.
42. Wu T.H. and Alex Watson. "Insitu shear tests of soil blocks with roots." Canadian Geotechnical Journal 35 (1998) : 36-45.
43. Wu T.H. ; McOmber, R.M. ; Erb, R.T. ; and Beal, B.E.. "A study of soil root interaction." Journal of Geotechnical Engineering 114(12) (1988) : 1351 – 1375.
44. Wu T.H. ; Mckinnel W.P.III ; Swanston D.N. . "Strength of Tree Roots and Landslides on Prince of Wales Island, Alaska." Canadian Geotechnical Journal 16 (1979) : 19 - 33.
45. Ziemer, R.R. and Swanston, D.N.. Root strength changes after logging in southeast Alaska. United State Department of Agriculture, Forest Service, Pacific North-West Forest and Range Experiment Station, Portland, DR, Research Note PNW-306. 1977.
46. Finn Krogstad "A Physiology and Ecology Based Model of Lateral Root Reinforcement of Unstable Hillslopes" A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of Science, University of Washington , 1995.

ภาคผนวก

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เสริมความแข็งแรงด้วยระบบรากพืชแบบผสมผสาน

ENGINEERING PROPERTIES OF SOIL REINFORCEMENT WITH COMBINATION ROOTS SYSTEM

พานิช วุฒิพฤษ (Panich Voottipruex)¹
 เชิดชนินทร์ หอมดมทิน (Chirdchanin Modmoltin)²
 ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข (Chairat Teerawattanasuk)³
 วรากร ไม้เรียง (Warakorn Mairang)⁴

^{1,3}สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ pnv@kmitnb.ac.th

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

⁴คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ : การเสริมความแข็งแรงให้แก่ลาดดินโดยใช้พืชนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติความแข็งแรงของรากเป็นหลัก การศึกษาครั้งนี้เน้นที่ผลกระทบของระบบรากแบบผสมผสานต่อเสถียรภาพของลาดดิน การวิบัติที่เกิดขึ้นต่อลาดดินมักเกิดขึ้นได้ง่ายในลาดดินที่มีระบบพืช รากตื้นหรือพืชล้มลุกมากกว่าที่จะเกิดในบริเวณที่เป็นป่าธรรมชาติที่หนาแน่นไปด้วยพืชตื้นและไม้ระบบรากยาว ในการศึกษาครั้งนี้วิเคราะห์ความแข็งแรงของรากที่ใช้เป็นพืชเบิกนำหญ้าแฝกและกระถินเทพา โดยจะนำไปปลูกในแปลงทดลองที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือวิทยาเขตปราชญ์บุรีในรูปแบบการปลูกที่ต่างกันเพื่อตรวจสอบการเจริญเติบโต จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติการยึดรั้งของราก โดยการดึงต้นพืชในสนามและทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่มีระบบรากพืชแพร่กระจายอยู่ทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ จากผลการศึกษาของการใช้ระบบรากพืชแบบผสมผสานพบว่าสามารถช่วยเสริมความแข็งแรงแก่ดินได้ และนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการพังทลายของลาดดินธรรมชาติได้

ABSTRACT : The mechanical stabilization of soil slopes by means of vegetation is mainly dependent on root strength properties. This study focussed on the effects of combination roots system on soil slope. The intensity of slope failures on moderate to steep slopes was generally higher in the slope occupying vegetation with shallow and weak root systems than that in the natural forest area which usually consists of indigenous trees with hard deep penetrating roots system. The pioneer species of vetiver grass and acacia mangium willd were selected to analyze the strength properties. In order to measure the growth rate, these species were planted in different pattern in a plot at King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok in Prachinburi campus. To assess the mechanisms of root anchorage and root reinforcement within one-year growth period, the plants were pullout to determine the pullout resistant and the roots permeated soil shear tests were conducted both in the field and in the laboratory. According to the combination of the root life, the test results reveal that the combination root system has significant affect on slope protection scheme. The study is successfully to propose the critical zone and selected soil moisture content to calculate the strength increment of the combination roots permeated soil system.

KEYWORDS : biotechnical, slope protection, combination system, Acacia Mangium Willd, viter grass

1. บทนำ

ในสภาพตามธรรมชาติไม่ว่าเป็นที่ราบหรือที่สูงชัน พืชทุกชนิดทำหน้าที่ปกป้องการกัดเซาะและพังทลายของหน้าดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อประชากรโลกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความต้องการในการขยายพื้นที่ครอบครองเพื่อการพัฒนาเป็นที่อยู่อาศัยและเกษตรกรรม ป่าไม้ตามธรรมชาติจึงถูกทำลายลงอย่างมาก ทำให้ลาดดินขาดเสถียรภาพ และเกิดการพังทลายในที่สุด โดยทั่วไปเสถียรภาพของลาดดินขึ้นอยู่กับสภาพทางธรณีวิทยา ลักษณะทางเรขาคณิต ความแข็งแรงของดิน สภาพภูมิอากาศ ระดับน้ำใต้ดิน การแก้ปัญหาความไม่เสถียรภาพของดินเพื่อทำให้ลาดดินนั้นปลอดภัย สามารถกระทำได้โดยวิธีทางชีววิศวกรรมหรือนิเวศวิศวกรรม ซึ่งหมายถึงการสร้างสมดุลของธรรมชาติ โดยนำประโยชน์ของรากพืชมาประยุกต์ใช้ในการป้องกันการเคลื่อนพังของดิน ไม่เพียงช่วยแก้ปัญหาแต่ยังมีความกลมกลืนกับสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี การแก้ไขอีกวิธีหนึ่งซึ่งในช่วงที่ผ่านมาได้มีการนำพืชมาใช้เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มเสถียรภาพความลาด โดยได้รับการยอมรับว่าสามารถนำมาใช้เพื่อป้องกันการกัดเซาะของหน้าดินเนื่องจากน้ำฝนและน้ำป่าที่ไหลบ่า และยังมีส่วนช่วยเพิ่มความต้านทานการเฉือนแก่ดิน ดินตะกอนปนทราย Wu et al. [1] ได้ศึกษาการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เกาะเวลส์ อลาสกา ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามซึ่งการทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถทดสอบสภาพอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของดิน Wu and Watson [2] ได้ทำการทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนามของระบบรากของ PinusRadiata อายุ 6-8 ปี Operstien and Fryman[3] ได้ทำการทดสอบแรงเฉือนบนตัวอย่างดินขอลักที่เสริมแรงด้วยรากของต้น Alfalfa, Rosemary, Pisticia Lentacia และ Meoporum Parvifolium อายุ 1-2 ปี Wu et al [1] ได้เสนอค่าเฉลี่ย 1.2 เท่าของกำลังรับแรงดึงและอัตราส่วนพื้นที่ราก Burroughs and Thomas [4], Gray [5] และ Turmanina- [6] ได้ทำการศึกษาหาค่าความแข็งแรงดึงของรากต้นไม้ พบว่า Rocky Mountain Douglas fir, Coastal Douglas และ Spruce-Hemlock เมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรากเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของรากมีค่าที่ลดลงยกเว้นรากของต้น Birch

ปัจจัยหลักของรากพืชที่มีผลต่อความแข็งแรงเฉือนของดินคือ ปริมาณและทิศทางการกระจายของรากพืช ความแข็งแรงต่อการรับแรงดึงของรากพืช โมดูลัสยืดหยุ่นของรากพืช ความแข็งแรงเฉือนของดิน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและรากพืช รากพืชมีผลต่อการกัดเซาะหน้าดิน และต่อเสถียรภาพของลาดดิน ทั้งลาดดินธรรมชาติ หรือลาดดินที่ถูกสร้างขึ้น ประสิทธิภาพของรากพืชต่อการกัดกร่อน หรือการเคลื่อนพังของลาดดินขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และขั้นตอนการพังทลายของดิน ในกรณีเสถียรภาพของลาดดินต่อการเคลื่อนพัง รากและลำต้นจะทำหน้าที่เสมือนวัสดุเสริมความแข็งแรงแก่ดิน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ระบายความชื้น หากลาดดินปราศจากรากพืชปกคลุม ทำให้ง่ายต่อการถูกกัดเซาะเวลาฝนตก ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญในการพังทลายของลาดดิน งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยทั่วไป ได้แก่ การเจริญเติบโตของพืชซึ่งมีผลโดยตรงกับขนาด ความลึกและการแผ่ขยายของรากพืช นอกจากนี้ยังทำการศึกษายปัจจัยที่มีผลต่อการรับแรงเฉือนของรากพืชได้แก่ปริมาณความชื้นในดิน รูปแบบในการปลูก เพื่อช่วยหาพารามิเตอร์ในการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เสริมความแข็งแรงด้วยรากพืชแบบผสมผสานในสนาม

1.1 ชนิดของพืช

พืชที่ใช้ในการวิจัยนี้มีอยู่ 2 ชนิดคือ กระถินเทพา และหญ้าแฝก

กระถินเทพามีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Acacia Mangium Leguminosae/Mimosaceae เป็นพันธุ์ไม้ต่างประเทศ มีถิ่นกำเนิดในรัฐควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย หมู่เกาะโมล็ดคาส ประเทศอินโดนีเซีย และแถบตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศปาปัวนิวกินี โดยพบขึ้นอยู่ทั่วไปบริเวณเขตติดต่อระหว่างป่าชายเลนและแนวป่าไม้พุ่มเตี้ย ตลอดจนป่าตามริมฝั่งแม่น้ำและทุ่งหญ้าต่างๆ ไม่พบขึ้นในป่าดิบชื้นที่มีไม้ใหญ่ขึ้นหนาแน่น กระถินเทพาจัดเป็นไม้บุกเบิกชนิดหนึ่งที่สามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ซึ่งสภาพแวดล้อมถูกทำลาย ดังนั้นจึงมีการนำไปปลูกเป็นสวนป่าในหลายประเทศ เช่น มาเลเซีย ปาปัวนิวกินี เนปาล ฟิลิปปินส์ บังกลาเทศ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการนำเข้ามาปลูกในปี พศ. 2523 เนื่องจากกระถินเทพามีคุณสมบัติเหมาะสมดังนี้ คือ เป็นไม้โตเร็ว มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าไม้

ข้อและบุคลากรที่ส ซึ่งไม้ทั้งสองชนิดจัดเป็นไม้โตเร็วมากที่สุด จำพวกหนึ่งที่เขตร้อน และ สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าไม้อื่นๆ ในสภาพดินที่ไม่ค่อยสมบูรณ์ เช่นดินลูกรัง ดินซึ่งผ่านการทำไร่ เลื่อนลอย และดินตามบริเวณพื้นที่ลาดชัน นอกจากนี้ยังสามารถ ขึ้นในดินที่มีความเป็นกรด

หญ้าแฝกเป็นพืชตระกูลหญ้าชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย และตะไคร้พบกระจายทั่วไปในหลายพื้นที่ โดย หญ้าแฝกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ ด้วย เหตุผลว่าหญ้าแฝกมีการแตกกอจำนวนมากและเบียดเสียดกัน หนาแน่น ออกแข็งแรงตั้งตรงสามารถปลูกติดต่อกันให้เป็นแถว กระดานเรียงหนึ่งได้ง่าย ทำหน้าที่เป็นกำแพงด้านทานตะกอน ดินที่ถูกน้ำกัดเซาะและพัดพามาทับถมด้านหน้าแนวหญ้าแฝก และช่วยลดความเร็วของกระแสน้ำให้ไหลซึมลงดิน

1.2 ระบบรากพืชแบบผสมผสาน

งานวิจัยเรื่องนี้เป็นน้อมรับ โครงการ ในพระราชดำริของ พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวซึ่งทรงนำหญ้าแฝกมาปลูกเพื่อ การอนุรักษ์ดินและน้ำมาประยุกต์ ด้วยเหตุที่หญ้าแฝกเป็นพืชที่มี เป็นลักษณะรากฝอย ขนาดเล็กและอวบน้ำ ถึงแม้จะมีความยาว หยั่งลึกลงไปถึงชั้นดินที่มีความมั่นคงได้ แต่ก็สามารถเสริมความ แข็งแรงให้แก่ดินได้ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในแง่การกัดเซาะ และช่วยสกัดการพัดพาหน้าดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ไม่ให้ไหล ไปกับความเร็วของกระแสน้ำ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดว่าหาก นำเอาระบบรากของหญ้าแฝกมาจัดรูปแบบการปลูกร่วมกับพืช ชนิดอื่นซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีธาตุอาหารต่ำและที่สำคัญ พืชชนิดนั้นต้องไม่ทำให้ระบบนิเวศวิทยาเดิมเปลี่ยนแปลงไป ซึ่ง เหมาะสมกับสภาพป่าเขาที่ถูกทำลายจนไม่เหลือความอุดม สมบูรณ์ โดยให้รากหญ้าแฝกมีบทบาทนำในเบื้องต้น จนกระทั่ง พืชที่ถูกเลือกมาเป็นไม้เบิกนำซึ่งในที่นี้คือกระถินเทพาสามารถ เจริญเติบโตและมีระบบรากที่แข็งแรงกว่าแฝกกระจายออกไปยึด ดินทั้งในทางราบและทางลึก ก็จะช่วยให้การพังทลายของดินใน ฤดูฝนเกิดได้ยากขึ้น เพราะแนวการเคลื่อนพังไม่สามารถตัดผ่าน ระบบรากที่แข็งแรงนี้ได้ เมื่อต้นกระถินเทพาเจริญเติบโตเต็มที่ก็ จะทำให้หญ้าแฝกมีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้าลงเนื่องจากอยู่ ภายใต้อาณาเขตของกระถินเทพา เมื่อระบบนิเวศวิทยาของพื้นที่ ได้รับการฟื้นฟูขึ้น พืชประจำถิ่นก็สามารถรุกคืบเจริญเติบโต ครอบครองพืชที่เดิม หลักการนี้เป็นวิธีการธรรมชาติบำบัด

เพื่อให้ธรรมชาติกลับคืนสู่สมดุลและยังเป็นการแก้ปัญหาเชิง วิศวกรรมอันได้แก่การพังทลายของลาดดินที่ได้ผลและยั่งยืน

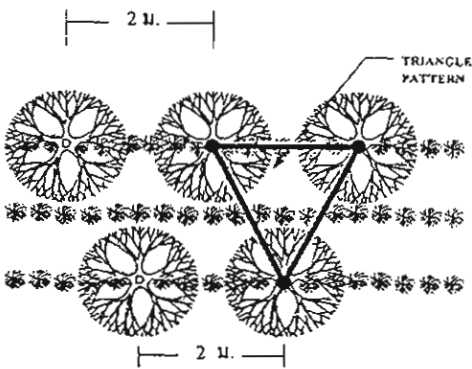
1.3 รูปแบบการปลูกแบบสามเหลี่ยม

ในการปลูกต้นกระถินเทพาและหญ้าแฝกในสนามนั้น เตรียมการ โดยปรับพื้นที่เดิมซึ่งรกร้างประมาณ 540 ตารางเมตร จากนั้นนำ ต้นกล้ากระถินเทพาจากศูนย์เพาะชำ อำเภอบางคล้าจังหวัด ฉะเชิงเทรา ซึ่งมีอายุประมาณ 2 เดือน มีความสูงเฉลี่ย 20 เซนติเมตร ปลูกแซมลงระหว่างแถวหญ้าแฝกที่เป็นแนวยาวโดย ให้เกิดรูปแบบการปลูกของกระถินเทพาเป็นแบบสามเหลี่ยม ดัง รูปที่ 1 แปลงทดลองอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีพระนครเหนือ ตำบลเนินหอม จังหวัดปราจีนบุรี แปลงทดลองนี้ไม่มีการร่นน้ำ และไม่ใส่ปุ๋ยเคมี เพื่อให้การเจริญเติบโตเป็นไปตามธรรมชาติ มากที่สุด ลักษณะการปลูกมีสามรูปแบบดังนี้

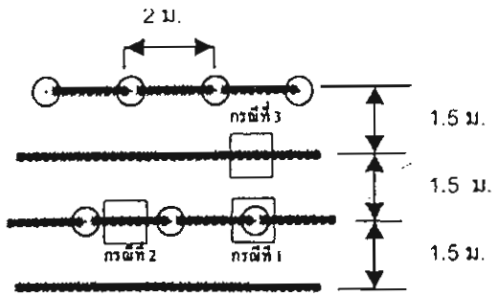
แบบที่หนึ่งปลูกหญ้าแฝกระยะห่างระหว่างต้น 0.20 เมตร ระหว่างแถวห่าง 1.5 เมตร โดยปลูกกระถินเทพาแซมมีระยะห่าง ระหว่างต้น 2 เมตร ระหว่างแถวห่าง 3 เมตร ดังรูปที่ 2

แบบที่สองปลูกหญ้าแฝกระยะห่างระหว่างต้น 0.20 เมตร ระหว่างแถวห่าง 1.4 เมตร โดยปลูกกระถินเทพาแซมมีระยะห่าง ระหว่างต้น 2 เมตร ระหว่างแถวห่าง 3 เมตร ดังรูปที่ 3

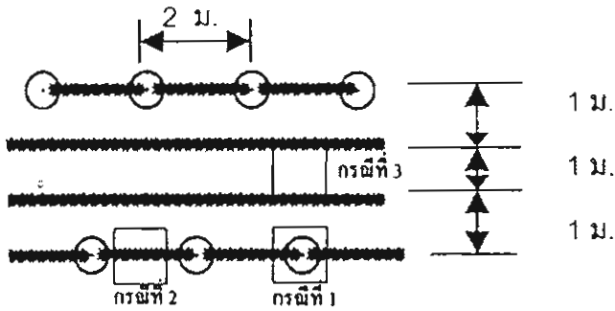
แบบที่สามปลูกหญ้าแฝกระยะห่างระหว่างต้น 0.20 เมตร ระหว่างแถวห่าง 1 เมตร โดยปลูกกระถินเทพาแซมมีระยะห่าง ระหว่างต้น 2 เมตร ระหว่างแถวห่าง 2 เมตร ดังรูปที่ 4



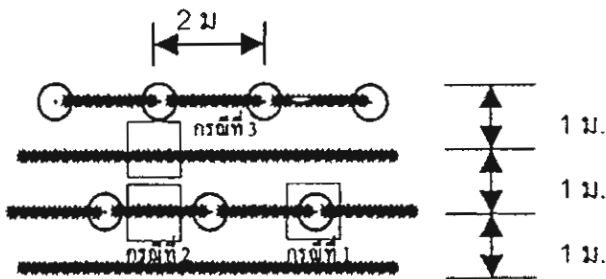
รูปที่ 1 การปลูกแบบสามเหลี่ยมทั่วไป



รูปที่ 2 การปลูกรูปแบบที่ 1 ในสนาม



รูปที่ 3 การปลูกรูปแบบที่ 2 ในสนาม



รูปที่ 4 การปลูกรูปแบบที่ 3 ในสนาม

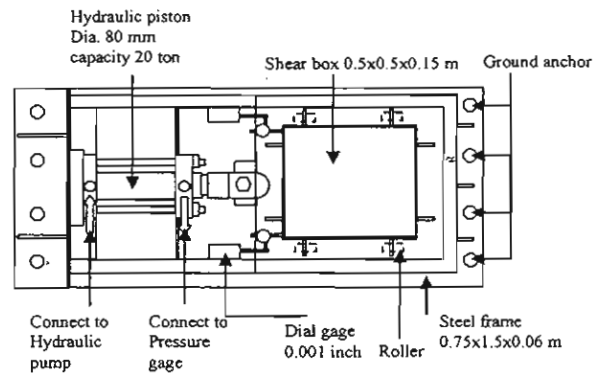
2. การทดสอบในสนาม

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบในสนามด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงและเครื่องมือทดสอบการถอนดึง โดยเลือกบริเวณพื้นที่ที่จะทำสอบให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการวิจัย คือการหาอิทธิพลของรากพืชแบบผสมผสานว่ามีส่วนช่วยเสริมความแข็งแรงแก่ดินในเชิงวิศวกรรมได้อย่างไร

2.1 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนาม

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินเสริมรากพืชในสนามเพื่อทำการศึกษากำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงในสนาม การทดสอบแรงเฉือนจึงทดสอบบริเวณดินที่ไม่ปลูกพืช ในตำแหน่งใต้ต้นพืชบริเวณระหว่างระยะห่างระหว่างต้น 1 เมตร และ 2 เมตร และบริเวณช่องว่างระหว่างลำต้น เมื่อการปลูกเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 2 x 1 ตร.ม. และ 2 x 2 ตร.ม. ทำการทดสอบโดย เครื่องทดสอบแรงเฉือนในสนามดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเครื่องประกอบด้วยโครง

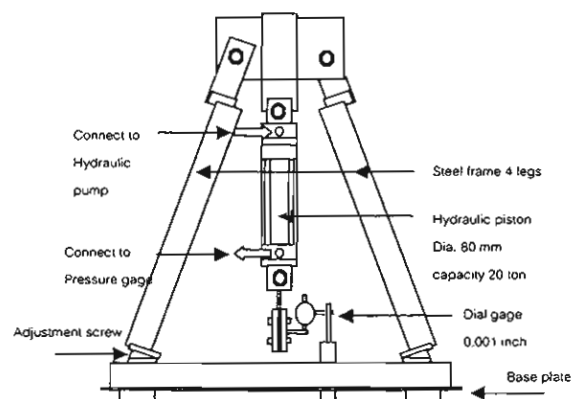
เหล็กขนาด 0.75 x 1.5 x 0.06 เมตร กระบอกไฮดรอลิก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ความจุ 20 ตัน ต่อเข้ากับ บัมไฮดรอลิกเพื่อเป็นการอัดกำลัง จากนั้นทำการวัดกำลังที่อัดโดย เกจวัดความดัน กล้องที่ใส่ตัวอย่างมีขนาด 0.5 x 0.5 x 0.15 เมตร หนา 2 มิลลิเมตร ด้านล่างของกล้องมีล้อสี่ล้อช่วยในการลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของกล้องกับโครงเหล็ก มีเกจวัด การเคลื่อนที่ในแนวราบสองตัว มีความละเอียด 0.001 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนของดินใน

2.2 การทดสอบแรงถอนดึงในสนาม

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงถอนดึงในสนามทำจากเสาเหล็กสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับระดับสูงต่ำได้ โดยมีเหล็กแผ่นขนาด 300 x 300 x 10 มิลลิเมตร ยาว 1.40 เมตร จำนวน 4 ชิ้น พร้อมชุดแผ่นเหล็กสำหรับจับหรือดึงกระดิ่งเทพาหรือหญาแฟก มีบัมไฮดรอลิกขนาด 100 ตัน มาตรฐานวัดความดันขนาด 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมาตรฐานวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้งความละเอียด 0.001 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงเครื่องมือทดสอบแรงถอนดึงในสนาม

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

คุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ทำการปลูกในสนามแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 และจากผลการทดสอบการกระจายตัวขนาดของเม็ดดินพบว่าดินมีขนาดคละที่ไม่ดีจึงจำแนกเป็น SP ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตัวอย่างดินที่ทำการปลูกในสนาม

PROPERTIES	
Specific Gravity, Gs	2.64
Dry unit weight of soil, t/m ³	1.85
Optimum moisture content, %	11.02
Liquid limit, %	27.55
Plastic limit, %	16.4
Classification	SP

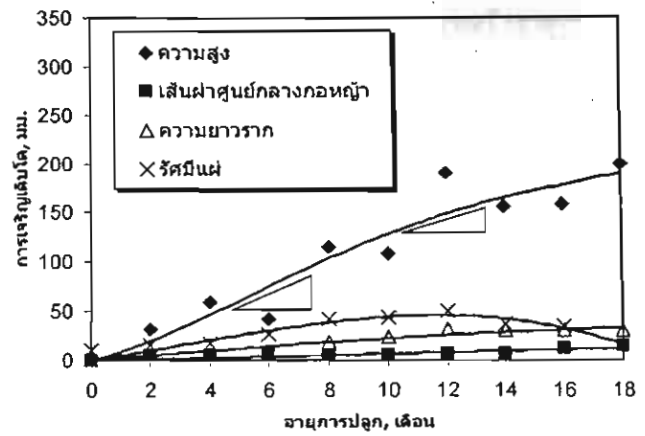
3.1 การเจริญเติบโตของกระถินเทพาและหญ้าแฝก

จากการศึกษาการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกและกระถินเทพา ตั้งแต่เริ่มต้นปลูกจนอายุ 18 เดือนพบว่าในช่วง 8 เดือนแรกอัตราการเจริญเติบโตของหญ้าแฝกสูงกว่ากระถินเทพาอย่างเห็นได้ชัด แต่ในช่วง 8 เดือนหลัง พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของกระถินเทพาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยหญ้าแฝกมีความสูงเพิ่มขึ้นจาก 30 มม. เป็น 200 มม. คิดเป็น 5.6 เท่าของความสูงเมื่อแรกปลูก ขณะที่กระถินเทพามีความสูงจาก 50 มม. เป็น 300 มม. คิดเป็น 5 เท่า ของต้นกล้าดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

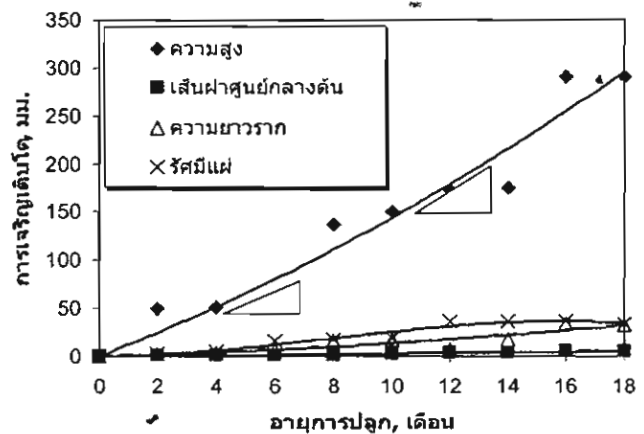
ในขณะเดียวกันพบว่ารัศมีการแผ่กระจายของรากหญ้าแฝกและกระถินเทพาตั้งแต่เริ่มต้นปลูกจนอายุ 18 เดือน รัศมีการหญ้าแฝกแผ่กระจายความกว้างจาก 10 มม. เป็น 50 มม. คิดเป็น 4 เท่า ของต้นกล้า ขณะที่รัศมีการกระถินเทพาแผ่กระจายความกว้างจาก 2 มม. เป็น 9 มม. คิดเป็น 3.5 เท่า ของต้นกล้า

จากการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นกระถินเทพาและกอหญ้าแฝกตั้งแต่เริ่มต้นปลูกจนอายุ 18 เดือนพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถินเทพาเพิ่มจาก 2 มม. เป็น 5 มม. หรือคิดเป็น 1.5 เท่าของต้นกล้า สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางของกอหญ้าแฝกเพิ่มจาก 5 มม. เป็น 14 มม. หรือคิดเป็น 1.8 เท่าของต้นกล้า

จากการศึกษาการความยาวของรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกตั้งแต่เริ่มต้นปลูกจนอายุ 18 เดือนพบว่ารากกระถินเทพามีความยาวเพิ่มขึ้นจาก 3 มม. เป็น 32 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 9.6 เท่าของต้นกล้า และรากหญ้าแฝกมีความยาวเพิ่มขึ้นจาก 5 มม. เป็น 30 มม. หรือคิดเป็น 5 เท่าของต้นกล้า



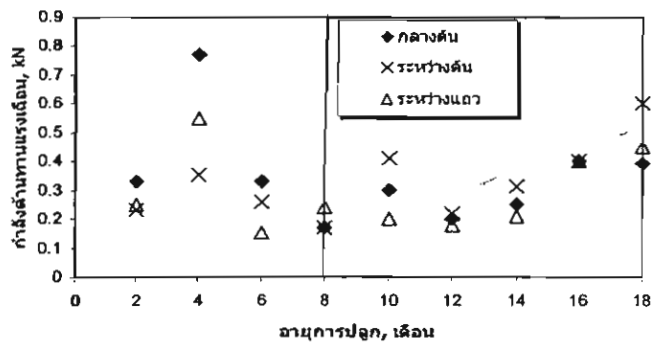
รูปที่ 7 ความเจริญเติบโตของหญ้าแฝกกับอายุการปลูกในสนาม



รูปที่ 8 ความเจริญเติบโตของกระถินเทพากับอายุการปลูกในสนาม

3.2 แรงเฉือนของดินที่เสริมรากพืชแบบผสมผสาน

จากผลการทดสอบแรงเฉือนของระบบรากพืชแบบผสมผสานในสนามพบว่า ในช่วงเวลาเปิดเดือนแรก ความแข็งแรงเฉือนของดินที่เสริมความแข็งแรงด้วยรากพืชตรงกลางต้นกระถินเทพาให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 0.3- 0.8 กิโลนิวตัน ขณะที่ความแข็งแรงเฉือนของดินระหว่างต้นและระหว่างแถวยังคงมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากได้รับอิทธิพลของรากหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียว แต่ในช่วงเปิดเดือนหลังซึ่งกระถินเทพามีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วดังอ้างถึงในรูปที่ 7 และ 8 ทำให้รากกระถินเทพาแผ่กระจายออกไปเกิดการผสมผสานกันของระบบรากพืช เป็นการเสริมความแข็งแรงแก่ดินเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 9

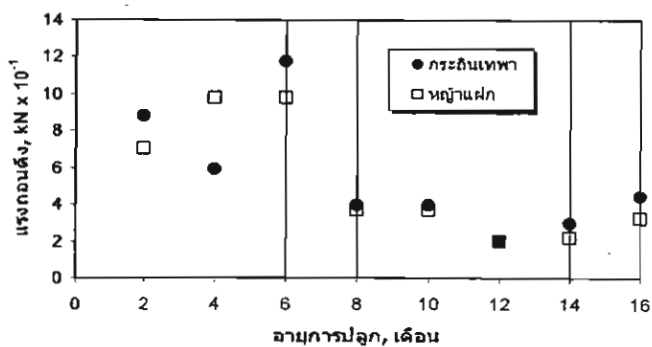


รูปที่ 9 กำลังต้านทานแรงเฉือนของระบบรากพืชแบบผสมผสาน
กับอายุการปลูก

3.3 กำลังต้านทานแรงดึงของดินที่เสริมรากกระถินเทพาและราก หญ้าแฝก

จากผลการทดสอบการถอนดิ่งในสนามพบว่า ในช่วง 6 เดือนแรกของการทดสอบการถอนดิ่งของหญ้าแฝกมีค่าสูงกว่ากระถินเทพา กล่าวได้ว่าในระยะแรกของการใช้ระบบรากพืชแบบผสมผสานนั้น หญ้าแฝกมีบทบาทนำอย่างเห็นได้ชัด สอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตที่ได้กล่าวถึงแล้ว นอกจากนี้แรงถอนดิ่งในช่วง 6 เดือนแรกมีค่าโดยเฉลี่ยสูงสุดเพราะอยู่ในช่วงฤดูแล้ง

หากพิจารณาในเดือนที่ 8 ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนแปลงฤดูกาลพบว่าแรงถอนดิ่งของรากพืชทั้ง 2 ชนิดลดลงโดยเฉลี่ยร้อยละ 50 และมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเข้าสู่ฤดูแล้งอีกครั้งหนึ่งในช่วงเดือนที่ 14 จะพบว่าแรงถอนดิ่งของระบบรากกระถินเทพาเริ่มมีค่ามากกว่าระบบหญ้าแฝกอย่างเห็นได้ชัดและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 9 แรงถอนดิ่งของรากกระถินเทพาและรากหญ้าแฝกเทียบกับอายุการปลูก

4. สรุปการวิจัย

จากการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเจริญเติบโตในช่วง 8 เดือนแรกของหญ้าแฝกสูงกว่ากระถินเทพา แต่ในช่วง 8 เดือนหลัง กระถินเทพามีอัตรา

เจริญเติบโตสูงกว่าหญ้าแฝกเพราะสามารถตรึงธาตุอาหารได้ดีกว่า

2. ในช่วง 8 เดือนแรกของการปลูกกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับระบบรากของหญ้าแฝกเป็นหลักแต่ในช่วง 8 เดือนหลัง เห็นได้ชัดว่าระบบรากพืชแบบผสมผสานช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ลาดดินได้อย่างมีนัยสำคัญ

3. แรงถอนดิ่งของรากพืชมีความสัมพันธ์กับฤดูกาลอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามระบบรากพืชมีส่วนสำคัญในการยึดดินไว้ไม่ให้เกิดการพังทลายลงได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยและขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wu T.H., Mckinnel W. P. III, and Swanston D. N. (1979) "Strength of tree roots and Landslides on Prince of Wales Island, Alaska", Canadian Geotechnical Journal 16: 19-23.
- [2] Wu T.H. and Watson A. (1998) "Insitu Shear Test of Soil Block with Roots", Canadian Geotechnical Journal 35: 36-45.
- [3] Operstien V. and Fryman S. (2000) "The Influence of Vegetation on soil Strength", Ground Improvement Journal, Vol. 4, No. 2: 81-89.
- [4] Borroughs E. R. and Thomas B. R. (1977) "Declining Root Strength in Douglas-fir after Felling as a Factor in Slope Stability", Research Paper INT-190, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Utah, U.S. Forest Service: 27.
- [5] Gray D. H. (1978) "Role of Woody Vegetation in Reinforcing Soils and Stability Slope", Symposium on Soils Reinforcing and Stabilizing Techniques. Sydney, Australia: 253-306.
- [6] Turmanina V. I. (1965) "The Strength of Tree Roots", in Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Biological Section, Vol. 70, No. 5, 36-45.



เอกสารประกอบการบรรยาย

การประชุมวิชาการงานสัปดาห์วิศวกรรมแห่งชาติ ประจำปี 2547
NATIONAL ENGINEERING WEEK 2004

หัวข้อการบรรยาย

**การป้องกันการพังทลายของเสาตึกรวมชาติบ้าน
การเคหะฯ ราชเทวีแผ้วถางและกระเด็นเทพา**

โดย

ผศ.ดร.ธานี ภูมิบุญ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.เอ็ดมันด์ ตมทนต์, มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.วิชัย สรรพพานต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การป้องกันการพังทลายของลาดดินโดยธรรมชาติบำบัด กรณีศึกษา รากหญ้าแฝกและกระถินเทพา

ผศ. ดร. พานิช วุฒิพฤกษ์

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ดร. เจริญนรินทร์ หอมลมทิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

รศ.ดร.วรากร ไม้เรียง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รศ.วิชัย สังวรปทานสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบรากพืชเสริมกำลังในดิน โดยทำการศึกษารากหญ้าแฝกและรากกระถินเทพา โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนแรกศึกษาคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินเสริมรากหญ้าแฝกได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการโดย พิจารณาผลกระทบเนื่องจากอายุการปลูก ศึกษากำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก ส่วนที่สองทำการปลูกคันกระถินเทพาและเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของพืช รวมทั้ง ปริมาณความชื้นในดิน ศึกษาผลที่เกิดจากรูปแบบในการปลูก และทดสอบแรงดึงของรากพืชในห้องปฏิบัติการ ศึกษา กำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินเสริมแรงด้วยรากพืชและแรงถอนในสนาม

จากผลการศึกษาพบว่า อัตราการเจริญเติบโตของรากหญ้าแฝกมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุการปลูก และค่าแรงดึงของรากมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงของรากมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น และค่ากำลังรับแรงเฉือนโดยตรงของดินที่เพิ่มขึ้นในห้องปฏิบัติการจะขึ้นอยู่กับปัจจัยของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อพื้นที่ หน้าตัดของดิน อายุการปลูก และความชื้นในดิน

ความเจริญเติบโตของคันกระถินเทพาในสนามระยะเวลา 14 เดือน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกรายการ ประมาณ 9-10 เท่าเทียบกับเริ่มปลูก ปริมาณน้ำในดินและปริมาณรากพืชเป็นปัจจัยหลักของกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมด้วยรากพืช ดังนั้นค่าที่เลือกใช้จึงเลือกที่ปริมาณน้ำในดินมีค่าสูงสุด ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นด้วยการเสริมด้วยรากกระถินเทพาคือกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่เสริมแรงมีค่า 40% มีค่าเท่ากับ 0.5 ksc กำลังรับแรงถอนดึงของรากมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กัระยะเวลาการปลูกมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.05 ksc ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจากการปลูกกระถินเทพาลักษณะที่เหลี่ยมจัตุรัส เท่ากับ 0.2 ksc

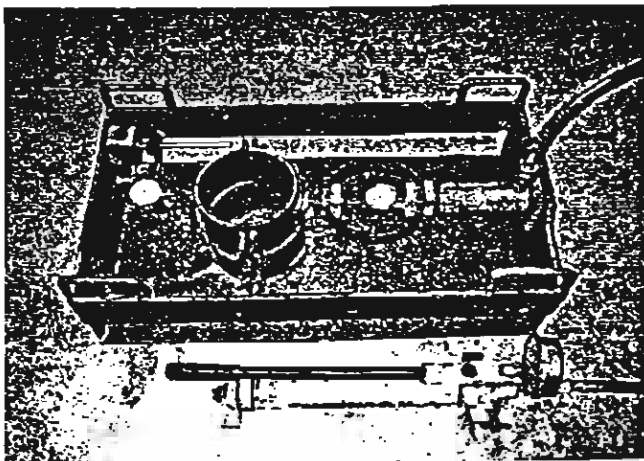
ดังนั้นจึงมีการนำไปปลูกเป็นสวนป่าในหลายประเทศ เช่น มาเลเซีย ปาปัวนิวกินี เนปาล ฟิลิปปินส์ บังกลาเทศ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการนำเข้ามาปลูกในปี พศ 2523

2 การทดสอบ

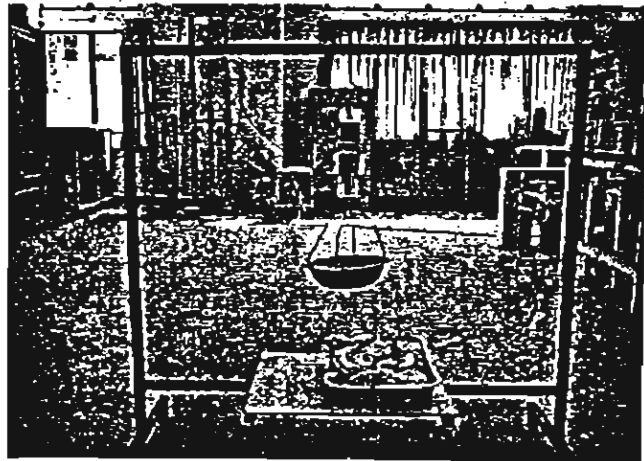
การศึกษานี้ได้ใช้หญ้าแฝก คือหญ้าแฝกคอนกุ่มพันธุ์เลข ซึ่งเป็นต้นกล้าที่อายุ 4 สัปดาห์ โดยมีความยาวของลำต้น 20 เซนติเมตร และความยาวของราก 5 เซนติเมตรปลูกลงในกระบอกตัวอย่างโดยใช้ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร แล้วทำการวัดขนาดและถ่ายภาพการเจริญเติบโตของรากหญ้าแฝก ทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากหญ้าแฝก และกำลังต้านทานแรงเฉือน โดยตรงของดินซึ่งเสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกและไม่ได้เสริมกำลังด้วยรากหญ้าแฝกในห้องปฏิบัติการและในสนามที่อายุการปลูก 2, 4, 6, 8 และ 10 เดือน ตามลำดับ



รูปที่ 1 ตัวอย่างหญ้าแฝกที่ปลูกในท่อพีวีซี

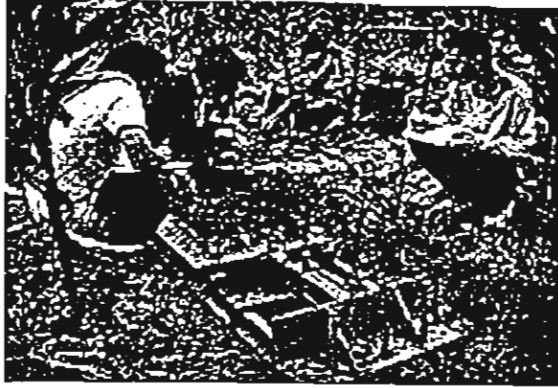


รูปที่ 2 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในห้องปฏิบัติการ รากพืช

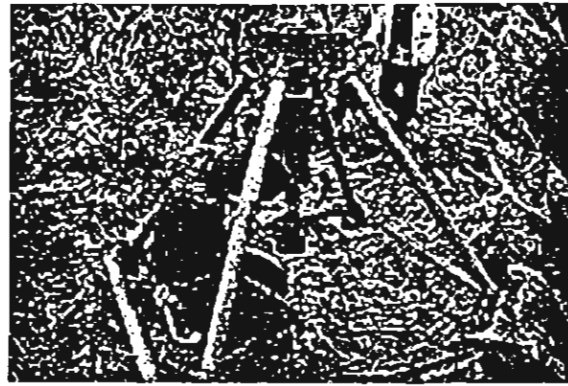


รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงดึงของ

รากพืช



รูปที่ 3 การทดสอบแรงเฉือนโดยตรงในสนาม



รูปที่ 4 การทดสอบแรงดึงของรากพืชใน

สนาม

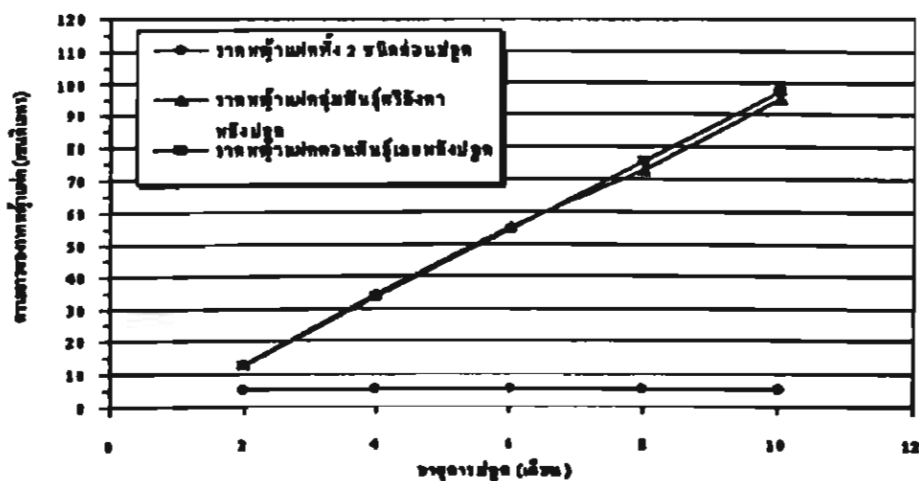
2.3 การทดสอบกำลังแรงดึงของรากในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของรากพืช โดยใช้เครื่องมือที่แสดงในรูปที่ 5 แต่ในกรณีที่รากพืชมีความแข็งแรงพอคือระยะเวลาการปลูกที่ 11-14 เดือน จะใช้เครื่อง Universal ทดสอบ

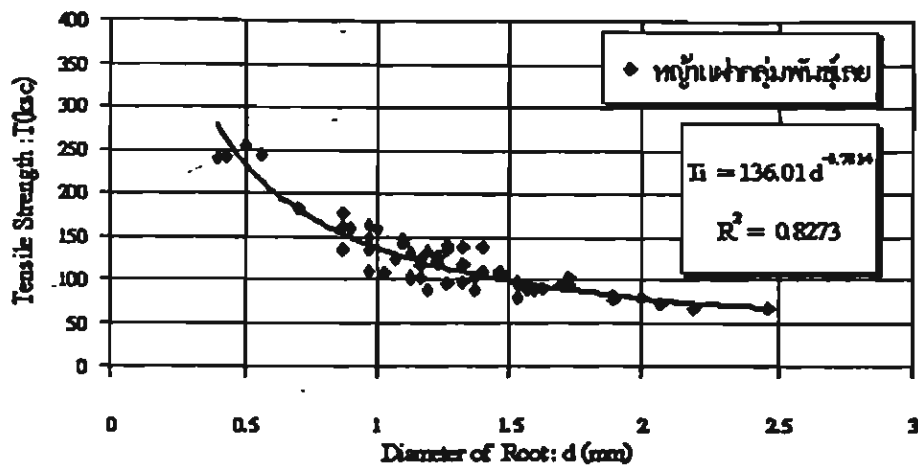
3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 อัตราการเจริญเติบโตของหญ้าแฝก

จากรูปที่ 5 อัตราการเจริญเติบโตของรากหญ้าแฝกมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุของการปลูกโดยความยาวของรากหญ้าแฝก หญ้าแฝกคอนกลุ่มพันธุ์ไทย มีการเจริญเติบโตอยู่ในช่วงร้อยละ 156 ถึง 1838 จากความยาวเดิมของรากต้นกล้า และกรณีการนำหญ้าแฝกไปประยุกต์ใช้งานควรพิจารณาหลังจากที่อายุ 4 เดือน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของรากหญ้าแฝกกับอายุการปลูกในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดึงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพญาเสือโคร่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพญาเสือโคร่ง จากรูปที่ 8 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากมีขนาดใหญ่ขึ้น เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงดึง

$$E_r = 2074.1 d^{-1.1686} \quad (3)$$

เมื่อ E_r = โมดูลัสยืดหยุ่นของราก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

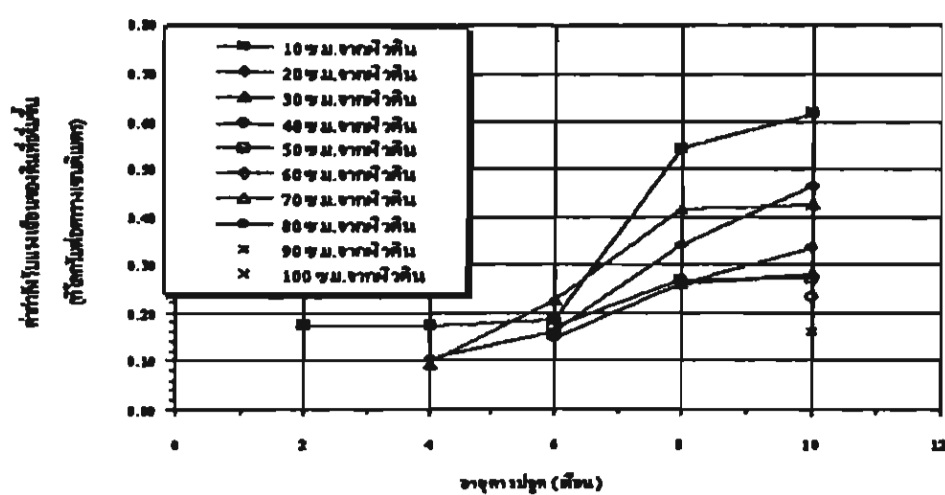
d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของราก (มิลลิเมตร)

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของรากพญาเสือโคร่งมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 1500 ถึง 4800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยรากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 0.70 ถึง 1.53 มิลลิเมตร

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรากพญาเสือโคร่ง

3.3 กำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงของดินในห้องปฏิบัติการ

เซนติเมตรจากผิวดินมีค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างสูงกว่าในช่วงระดับความลึกอื่นๆ และที่อายุของการปลูกตั้งแต่ 4 เดือน ขึ้นไปอีกด้วย เนื่องจากในช่วงความลึกดังกล่าวมีค่าอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดินสูง และยังพบว่าค่าร้อยละของกำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจะแปรผกผันกับระดับความลึกของดินอีกด้วย

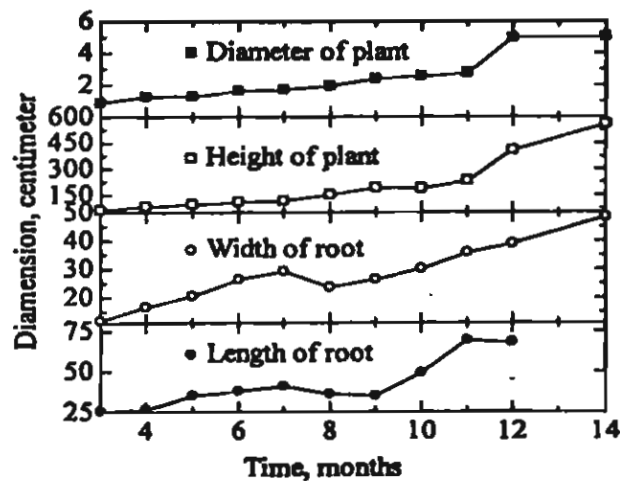


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นในห้วงปฏิบัติการกับ อายุการปลูกที่ระดับความลึกต่างๆกันกรณีเสริมรากหญ้าแฝกคอนกรีตกลุ่มพันธุ์เลข

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นกับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน จากรูปที่ 11 พบว่าถ้าพิจารณาที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตามกับอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของรากต่อพื้นที่หน้าตัดของดิน และมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอายุของการปลูก โดยมีค่าพิสัยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.17 ถึง 0.62 สำหรับกรณีหญ้าแฝกคอนกรีตพันธุ์เลขและ 0.14 ถึง 0.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ

3.4 การเจริญเติบโตของพืช

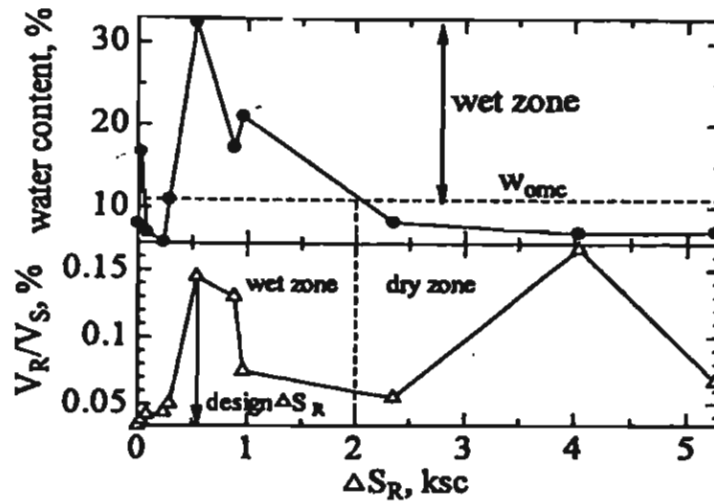
ความเจริญเติบโตของต้นกระถินเทพาในสนาม ตั้งแต่เริ่ม 3 เดือน ถึง 14 เดือน โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกรายการ ดังแสดงในรูปที่ 13 ความสูงของต้นกระถินเทพาเพิ่มขึ้นจากแรกปลูกคิดเป็น 10 เท่า หรือ 5.6 เมตร เทียบจากเดิม 0.64 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางต้นกระถินเทพาเพิ่มขึ้นจากแรกปลูกคิดเป็น 9 เท่า หรือ 5.07 ซม. เทียบจากเดิม 0.87 ซม. ความแผ่กว้างของรากต้นกระถินเทพาเพิ่มขึ้นจากแรกปลูกคิดเป็น 9 เท่าหรือ 48.42 ซม. เทียบจากเดิม 11.83 ซม. ความยาวของรากต้นกระถินเทพาเพิ่มขึ้นจากแรกปลูกคิดเป็น 10 เท่าหรือ 230 ซม. เทียบจากเดิม 25.93 ซม.



รูปที่ 13 การเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ความยาวราก การแผ่ขยายของราก ความสูงต้น และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโคนต้น เทียบกับเวลาในการปลูก

3.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนของดินในสนาม

จากการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินและดินเสริมรากพืชในสนามดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่า กำลังรับแรงเฉือนของดินเสริมด้วยรากพืชมีค่าสูงกว่าดินปกติ แต่การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินและดินเสริมรากพืชไม่ได้เพิ่มขึ้นตามเวลาการปลูกเนื่องจากอิทธิพลของปริมาณน้ำในดินซึ่งเปลี่ยนไปตามฤดูที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนในเดือนที่ 10 ถึง 13 เป็นช่วงเวลาในฤดูฝน พบว่ากำลังรับแรงเฉือนของทั้งดินและดินเสริมรากพืชมีค่าลดลงอย่างมาก กำลังรับแรงเฉือนของดินในสนามที่ไม่โดนรบกวน เพื่อสามารถเข้าใจพฤติกรรมของดินเสริมด้วยรากพืชได้อย่างชัดเจน ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเฉือนของรากพืช (Shear strength of root, $\square S_R$) ต่อกำลังรับแรงเฉือนของดิน, S เทียบกับระยะเวลาในการปลูก

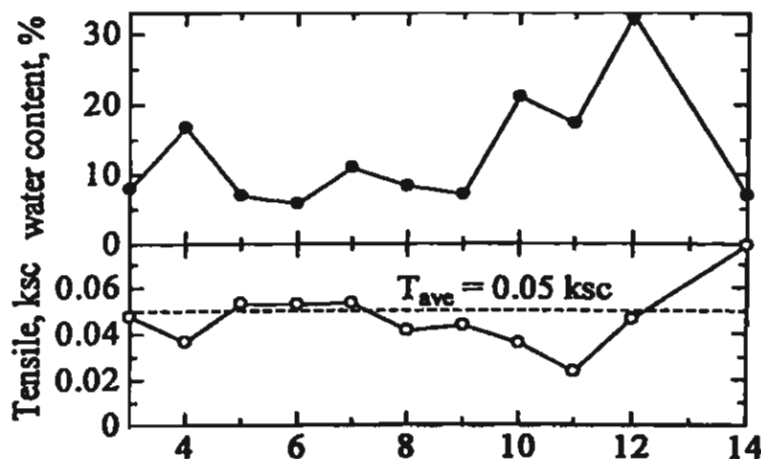


รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือนของรากพืช (shear strength of root, ΔS_R) กับอัตราส่วนของ ปริมาตรรากพืชต่อปริมาณดิน (V_R/V_S) และปริมาณในดิน

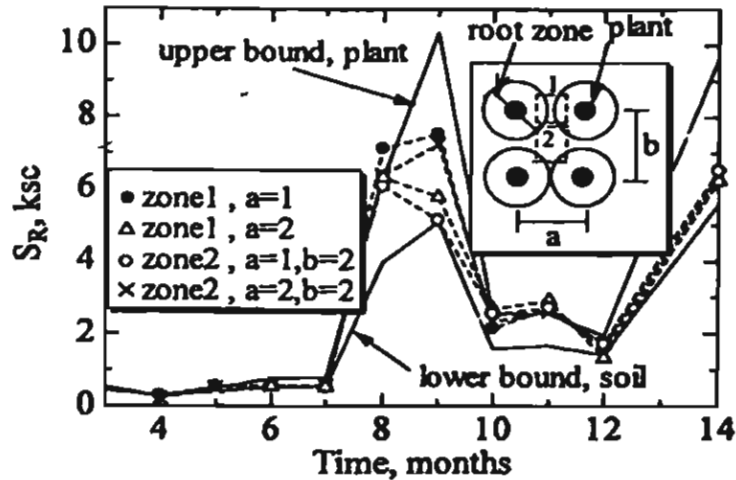
3.7 แรงกดดันของรากพืชในสนาม

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดดันของรากซึ่งได้จากแรงกดดันของรากหารด้วยพื้นที่ผิวสัมผัส และปริมาณน้ำในดิน ดังแสดงในรูปที่ 17 พบว่ากำลังรับแรงกดดันของรากมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับการ ปลูก แต่อาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากปริมาณน้ำในดิน ดังนั้นจึงสามารถเฉลี่ย กำลังรับแรงกดดันของราก กระดินเทพาเท่ากับ 0.05 ksc

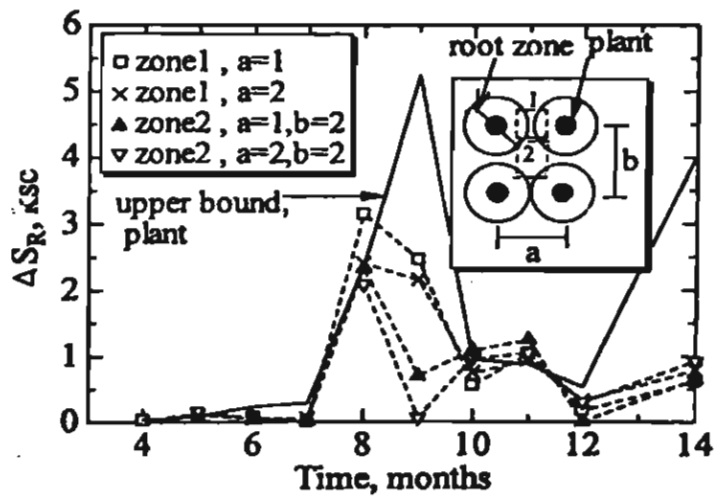
ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่ากับกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับ $\Delta S_R = 10T_R$



รูปที่ 17 กำลังรับแรงกดดันของรากและปริมาณน้ำในดินเทียบกับเวลาการปลูกในสนาม



รูปที่ 19 กำลังรับแรงเดือนของดินที่เสริมและไม่ได้เสริมด้วยรากพืช ในบริเวณต่างๆ เทียบกับระยะเวลาปลูก



รูปที่ 20 กำลังรับแรงเดือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมด้วยรากพืชในบริเวณต่างๆ ของการทดสอบในสนาม

จากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเดือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสริมด้วยรากกระดินเทพาค่ระยะเวลาดังแสดงในรูปที่ 20 พบว่า กำลังรับแรงเดือนในตำแหน่ง 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาในเดือนที่ 12 ซึ่งมีปริมาณความชื้นในดินสูงสุด พบว่ากำลังรับแรงเดือนในกรณีระหว่างสองคันระยะห่าง 1 และ 2 เมตรประมาณ 0.25 ksc ในกรณีระหว่าง 4 คัน ระยะ 1x2 และ 2x2 มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.2 ksc ดังนั้นค่ากำลังรับแรงเดือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลูกกระดินเทพาลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 2 เมตร เป็นระยะเวลา 1 ปี มีค่าเท่ากับ 0.2 ksc

13. แรงดึงของรากกระดินเทพาในห้อยปฏิบัติการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการปลูกจนถึงเดือนที่ 6 แล้วจึงลดลงไปจนคงที่ มีค่าประมาณ 250 ksc และแนวโน้มของ เมคูลัสก็มีลักษณะเดียวกัน คือเพิ่มขึ้นไปจนถึงเดือนที่ 6 และลดลง

14. กำลังรับแรงเฉือนในกรณีระหว่างสองคันระยะห่าง 1 และ 2 เมตรประมาณ 0.25 ksc ในกรณีระหว่าง 4 คัน ระยะ 1x2 และ 2x2 มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 0.2 ksc ดังนั้นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลูกกระดินเทพาลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 2 เมตร เป็นระยะเวลา 1 ปี มีค่าเท่ากับ 0.2 ksc

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุน โครงการ ภูมิสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่เสริมโดยระบบรากพืชแบบผสมผสานสำหรับงานป้องกันลาดชันดิน (กรณีศึกษา รากกระดินเทพาและหญ้าแฝก)

6. เอกสารอ้างอิง

1. Wu, T.H., 1976, "Investigation of Landslides on Prince of Wales Island", Geotechnical Engineering Report 5, Civil Engineering Department, Ohio State University, Columbus, Ohio, p. 94.
2. ทวีศักดิ์ ระมิงวงศ์ และ ชาญ ดันติสฤณ, 2522, ธรณีวิทยาสำหรับวิศวกร, มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.
3. วิชัย สังวรปทานสกุล, พานิช วุฒิพฤกษ์ และ วราธร แก้วแสง, 2544, "กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวเสริมด้วยรากหญ้าแฝกคอนกรีตอัดแรง", สัมมนาวิศวกรรมการทาง, กรุงเทพฯ.
4. กรมพัฒนาที่ดิน, 2541, คู่มือความรู้เรื่องหญ้าแฝก, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, หน้า 115.
5. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (สำนักงาน กปร.), 2542, "หญ้าแฝกคืออะไร", สารความรู้เรื่องหญ้าแฝก, รุ่งเพชรการพิมพ์, กรุงเทพฯ, หน้า 13.
6. กรมพัฒนาที่ดิน, 2537, คู่มือการดำเนินงานเกี่ยวกับหญ้าแฝก, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ, หน้า 95.
7. คีดี แห่งเซาวันิช, 2541, "Vertiver Grass for Slope Stability and Erosion Control", Pacific Rim Vertiver Network Technical Bulletin, No. 2, p. 4-16.
8. Deere, D.U. and Patton, F.D., 1971, "Slop Stability in Residual Soils", Proceeding 4 Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
9. Vidal, H., 1969, "The Principle of Reinforced Earth", Highway Research Record, No. 282, p. 1-16.
10. Schlosser, F. and Long, N.T., 1974, "Recent Results in French Research on Reinforced Earth", Journal of Construction Division, ASCE, No. 3, p. 223-237.