สมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สักในไทยที่แปรผันตามขนาดจำกัดที่ส่วนปลายลำต้น

Variable-top Merchantable Volume Equations for Teak (*Tectona grandis* Linn. f.) in Thailand

ทศพร วัชรางกูร Tosporn Vacharangkura[1]

วรพรรณ หิมพานต์ Woraphun Himmapan [1]

.....

ABSTRACT

Variable-top merchantable volume equations for teak plantation were first developed in Thailand. In this study, data of 196 sample trees were collected from 15 teak stands in 11 provinces represented the various sites of teak plantations. The plantation age ranged from 9 to 44 years. The mean diameter over bark at breast height of the sample trees ranged from 5.7 to 42.1 cm and the mean total height ranged from 6.3 to 29.2 m. The total stem volume equations were constructed for predicting individual trees volume. The volume ratio models introduced by Burkhart (1977), Cao and Burkhart (1980) and Van Deusen *et al*. (1981) were used for developing variable-top merchantable volume equations for teak. Variable-top merchantable volume equations were jointly estimated as a product of total volume and volume ratio equations. These equations presented here can be used for predicting total stem volume and merchantable volume to top diameter limit or any height limit of individual trees. The results from the models tested revealed that the models of Van Deusen *et al*. (1981) and Cao and Burkhart (1980) gave the best fits for volume ratio equations to variable-top diameter limits and height limits, respectively, however model validation with an independent data set suggested that both models could be applied for developing variable-top equations for teak in Thailand.

Keywords : volume ratio equation, total tree volume, variable-top diameter, variable-top height

[1]ส่วนวนวัฒนวิจัย สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Corresponding Author : autist_yakusa70@hotmail.com

รับต้นฉบับ 7 มกราคม 2562 รับลงพิมพ์ 11 กุมภาพันธ์ 2562

บทคัดย่อ

สมการสำหรับประมาณปริมาตรที่เป็นสินค้าได้ของสักด้วยวิธีการหาอัตราส่วนของปริมาตรทั้งหมดกับปริมาตรส่วนที่เป็นสินค้าได้ตามขนาดจำกัดใดๆทางด้านความยาวหรือเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ส่วนปลายต้นที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์ ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในประเทศไทย ในการศึกษาครั้งนี้ทำการเก็บตัวอย่างต้นสัก 196 ต้น จาก 15 สวนป่า ใน 11 จังหวัด ซึ่งเป็นตัวแทนของลักษณะพื้นที่ที่หลากหลายสวนป่ามีอายุระหว่าง 9-44 ปี ค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกนอกเปลือก อยู่ในช่วง 5.7-42.1 เซนติเมตร และความสูงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.3-29.2 เมตร สมการสำหรับประมาณปริมาตรส่วนลำต้นทั้งหมดได้สร้างขึ้นเพื่อการคาดคะเนปริมาตรรายต้น และได้นำแบบจำลองของ Burkhart (1977), Cao and Burkhart (1980) and Van Deusen *et al*. (1981) มาพัฒนาเป็นสมการประมาณปริมาตรส่วนที่เป็นสินค้าได้ที่แปรผันตามขนาดจำกัดใดๆทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นหรือความยาวลำต้นที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์สมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้นี้คือผลลัพธ์จากการประมาณร่วมกันของปริมาตรส่วนลำต้นทั้งหมดกับสมการอัตราส่วนนั่นเอง สมการที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดและปริมาตรส่วนที่เป็นสินค้าได้ที่ขนาดจำกัดใดๆผลของการทดสอบแบบจำลองปรากฏว่า แบบจำลองของ Van Deusen *et al*. (1981) และ Cao and Burkhart (1980) เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุด ในการนำมาใช้ประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ที่ขนาดจำกัดใดๆทางด้านเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นและทางด้านความสูง(ยาว)ของลำต้น ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ชุดข้อมูลอิสระในการทดสอบนั้น แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ทำการศึกษาทุกแบบ สามารถนำมาใช้ในการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าที่มีขนาดจำกัดของการใช้ประโยชน์แปรผันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นหรือความยาวลำต้นสำหรับไม้สักในประเทศไทยได้

คำสำคัญ : สมการอัตราส่วน, ปริมาตรส่วนลำต้นทั้งหมด, ขนาดจำกัดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใดๆ ที่ปลายต้น, ขนาดจำกัดของความยาวใดๆ ที่ปลายต้น

บทนำ

ปัจจุบันนี้ปริมาณความต้องการใช้ไม้ซุงท่อนเพื่อการพาณิชย์ในประเทศไทยเพิ่มขึ้นมาก การประมาณปริมาตรไม้รายต้นและการคาดคะเนปริมาตรของหมู่ไม้ให้มีความแม่นยำสูงจึงมีความสำคัญต่อเจ้าของสวนป่าเป็นอันมาก เพราะจะทำให้สามารถทราบผลตอบแทนทางการเงินจากการปลูกสร้างสวนป่าได้อย่างถูกต้อง ในอดีตที่ผ่านมา การประมาณปริมาตรไม้รายต้นทั้งหมด (total volume) นั่นคือปริมาตรจากโคนถึงปลายยอดสุดของลำต้น มักใช้สมการแอลโลเมตรีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) และความสูงทั้งหมด (total height) เป็นตัวแปรอิสระ สมการดังกล่าวสามารถนำไปประมาณปริมาตรไม้ทั้งหมดหรือปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ตามขนาดจำกัดความยาวของลำต้นหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นที่จะนำไม้นั้นไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ประมาณปริมาตรไม้ซุงท่อนที่จะทำเป็นสินค้า

ได้จากโคนต้นถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 10 เซนติเมตร หรือประมาณปริมาตรจากโคนถึงปลายท่อนที่ความยาว 15 เมตร เป็นต้น ซึ่งสมการประมาณปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ที่ขนาดจำกัดใดๆนี้ จะเป็นสมการที่เป็นอิสระต่อกัน เนื่องจากเป็นสมการที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลตัวอย่างไม้ที่แตกต่างกัน ดังนั้นถ้านำสมการดังกล่าวมาใช้ประมาณปริมาตรไม้ต้นเดียวกันแต่ขนาดจำกัดการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกันก็มีโอกาสที่การประมาณปริมาตรจะมีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งจะทำให้การคาดคะเนปริมาตรของหมู่ไม้มีความคลาดเคลื่อนสูงตามไปด้วย และเนื่องจากในปัจจุบันนี้ความต้องการใช้ประโยชน์ไม้ซุงท่อนที่มีขนาดต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นขนาดความยาวของลำต้นหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ปลายท่อนก็ตาม มีความหลากหลาย ประกอบกับเทคโนโลยีการผลิตไม้มีความก้าวหน้ากว่าในอดีตมาก ดังนั้นวิธีการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ที่ขนาดจำกัดใดๆ ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการจึงมีความจำเป็น เพราะจะทำให้การประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้มีความถูกต้องแม่นยำและมีความสะดวกรวดเร็วยิ่งกว่าวิธีการที่ใช้อยู่เดิม

วิธีการหนึ่งในการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าคือการสร้างสมการอัตราส่วนปริมาตร (volume ratio equations)ซึ่งคือฟังก์ชั่นคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ (merchantable volume) ต่อปริมาตรไม้ทั้งหมด (total volume) โดยใช้ขนาดจำกัดทางเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นหรือความยาวของลำต้นที่ส่วนปลายของลำต้นที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์เป็นตัวแปรอิสระตัวหนึ่งของสมการการใช้สมการอัตราส่วนของปริมาตรเป็นวิธีการที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน เช่นเดียวกันกับวิธีการใช้สมการความเรียว (taper equation) การประมาณปริมาตรรายต้นของไม้สักในประเทศไทย โดยการพัฒนาและสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ดังกล่าวนั้น มีการศึกษาในประเทศไทยเฉพาะการพัฒนาและสร้างสมการความเรียวเพื่อประมาณปริมาตรไม้สักในสวนป่าภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งเก็บข้อมูลจากสวนป่าขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ จำนวน 8 สวนป่า อายุระหว่าง 10-46 ปี (Warner *et al*., 2016)

การประมาณปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้สำหรับไม้สักในสวนป่าของประเทศไทย โดยใช้วิธี volume ratio ยังไม่มีการศึกษาในประเทศไทยมาก่อน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้เพื่อพัฒนาสมการประมาณปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้สำหรับไม้สักในสวนป่าของประเทศไทย โดยสมการที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำไปประมาณหาปริมาตรลำต้นไม้สักที่แปรผันไปตามขนาดจำกัดทางด้านความยาวหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นตรงปลายสุดของลำต้นที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์ (top-variable merchantable volume equations)

วิธีการศึกษา

การเก็บข้อมูล

ข้อมูลไม้สักที่ใช้ในการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองได้จากสวนป่าไม้สักขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้และสวนป่าเอกชน ซึ่งตั้งอยู่ในท้องที่จังหวัดต่างๆ ของประเทศไทย ครอบคลุมสภาพพื้นที่และสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน จำนวน 15 สวน ใน 11 จังหวัด สวนสักมีอายุระหว่าง 9-44 ปี จำนวนไม้ตัวอย่าง 196 ต้นรายละเอียดตาม Table 1ในแต่ละสวนป่าเมื่อทำการคัดเลือกไม้ตัวอย่างให้กระจายตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) ของไม้ใน

สวนแล้ว ทำการตัดโค่นไม้ตัวอย่างให้ใกล้ระดับชิดดินมากที่สุด วัดความยาวลำต้นของต้นไม้ทั้งหมด โดยวัดรวมความสูงของตอด้วย จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ระดับชิดดิน ที่ระดับ 30 เซนติเมตร และ 1.30 เมตร เหนือพื้นดิน จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทุกๆ ความยาว 1 เมตร จนถึงจุดที่ความยาวของส่วนปลายลำต้นเหลือน้อยกว่า 1 เมตรเพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาปริมาตรทั้งต้น

การวิเคราะห์ข้อมูล

คำนวณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด โดยใช้ Smalian's formula ปริมาตรทุกท่อนเป็นปริมาตรเหนือเปลือก (รวมเปลือก) โดยท่อนโคนถึงท่อนรองสุดท้ายคำนวณเป็นรูปทรงกระบอก ส่วนท่อนปลายคำนวณเป็นรูปกรวย จากนั้นคำนวณปริมาตรของลำต้นทั้งหมด (total stem volume) โดยการรวมปริมาตรของทุกท่อนจากโคนถึงปลายท่อน ในขณะที่ปริมาตรส่วนที่เป็นสินค้าได้ (merchantable volume) คำนวณปริมาตรจากโคนถึงระดับ 0.30 เมตร 1.30 เมตร และจากระดับ 1.30 เมตร คำนวณปริมาตรทุกๆ ความยาว 2 เมตร จนถึงปลายท่อนที่มีความยาวเท่ากับหรือน้อยกว่า 2 เมตร จะถูกตัดทิ้งไป ซึ่งการคำนวณที่ 2 เมตร เนื่องจากในประเทศไทยการตัดทอนต้นไม้จะใช้ที่ 2 เมตร เป็นค่าต่ำสุด ดังนั้นชุดข้อมูลของปริมาตรส่วนที่เป็นสินค้าสะสมของไม้ตัวอย่างแต่ละต้นจะประกอบด้วยปริมาตรจากโคนต้นถึงระดับ 1.30 เมตร 3.30 เมตร 6.30 เมตร จนถึงท่อนสุดท้าย (ตัดท่อนปลายที่มีความยาวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 เมตร ออก)

การพัฒนาแบบจำลอง

1.สมการประมาณปริมาตรของลำต้นทั้งหมด (total volume equations)

แบบจำลองที่นำมาใช้สร้างสมการประมาณปริมาตรของลำต้นทั้งหมด คัดเลือกมาจากการตรวจเอกสารที่มีผู้นิยมใช้ประมาณปริมาตรลำต้นไม้อย่างแพร่หลาย และเห็นว่ามีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับการศึกษานี้ ประกอบด้วย 4 แบบจำลอง ดังนี้

$$Vt = \beta_{11}(DBH^2\ H)^{\beta_{21}} + e_i \quad \text{.....(1)}$$

$$Vt = \beta_{12} DBH^{\beta_{22}}\ H^{\beta_{32}} + e_i \quad \text{.....(2)}$$

$$Vt = \beta_{13} + \beta_{23}(DBH^2 H) + e_i \quad \text{.....(3)}$$

$$Vt = \beta_{14} + \beta_{24}(DBH)^2 + e_i \quad \text{.....(4)}$$

โดย Vt = ปริมาตรส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด (ลบ.ม.)

DBH = เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (เซนติเมตร)

H = ความสูงทั้งหมดของต้นไม้ (เมตร)

$\beta_{11} \ldots \beta_{24}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของการประมาณ

e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณ

แบบจำลอง (1) คือ allometric relation ซึ่งนิยมใช้กันมากในวงการป่าไม้ อยู่ในรูปของ power model หรือเรียกอีกอย่างว่า allometric relation (Gould, 1979) แบบจำลอง (2) คือ Schumacher and Hall volume equation (Schumacher and Hall, 1993)) แบบจำลอง (3) คือ combined variable volume equation (Spurr, 1952) และแบบจำลอง (4) คือ local volume equation

2.สมการประมาณปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ (Merchantable volume equations)

แบบจำลองที่ใช้ในการสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยวิธีอัตราส่วนปริมาตร (volume ratio method) และเนื่องจากขนาดจำกัดของลำต้นของไม้ที่นำไปใช้ประโยชน์ สามารถกำหนดเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นหรือความยาว (ความสูง) ของลำต้นก็ได้เช่นกัน ดังนั้นแบบจำลองที่จะนำมาใช้สร้างสมการจึงเป็นแบบจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น หรือความยาวของลำต้น เป็นตัวแปรอิสระ ในการศึกษานี้ใช้แบบจำลองที่นำไปใช้สร้าง volume ratio equations 4 แบบจำลอง ดังนี้

$$Rd = 1 + \beta_{15}\left(\frac{d^{\beta 25}}{DBH^{\beta 35}}\right) + e_i \quad \text{.....(5)}$$

$$Rd = \exp\left[-\beta_{16}\left(\frac{d^{\beta 26}}{DBH^{\beta 36}}\right)\right] + e_i \quad \text{.....(6)}$$

$$R_{\mathbf{h}} = 1 + \beta_{17}\left[\frac{(H-_{\mathbf{h}})^{\beta 27}}{H^{\beta 37}}\right] + e_i \quad \text{.....(7)}$$

$$R_{\mathbf{h}} = \exp\left\{-\beta_{18}\left[\frac{(H-_{\mathbf{h}})^{\beta 28}}{H^{\beta 38}}\right]\right\} + e_i \quad \text{.....(8)}$$

โดย

Rd = อัตราส่วนของปริมาตรที่เป็นสินค้าได้ (to top diameter limit, d)กับปริมาตรส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด (Vd/Vt)

$R_{\mathbf{h}}$ = อัตราส่วนของปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ (to tree top height limit, h) กับปริมาตรส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด ($V_{\mathbf{h}}/Vt$)

d = ขนาดจำกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์ (top diameter limit, cm)

$\mathbf{h}$ = ความยาว (ความสูง) ของลำต้นที่จะนำไม้ไปใช้ประโยชน์ (top height limit, m)

DBH = เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (diameter at breast height, cm)

H = ความยาวของลำต้น(height, m)

$\beta_{15}...\beta_{38}$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของการประมาณ

e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณ

แบบจำลอง (5) คือแบบจำลองที่นำเสนอโดย Burkhart (1977) แบบจำลอง (7) นำเสนอโดย Cao and Burkhart (1980) และแบบจำลอง (6) และ (8)เป็นแบบจำลองที่นำเสนอโดย Van Deusen และคณะ (Van Deusen et al., 1981)

3.การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อคัดเลือกสมการประมาณปริมาตรไม้ที่เหมาะสม

สมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด (total volume equations) ที่สร้างโดยแบบจำลอง (1) วิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี non-linear regression แบบจำลอง (2) โดยวิธี multiple linear regression แบบจำลอง (3) และ (4) โดยวิธี simple linear regression

สมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ที่ขนาดจำกัดใดๆ(variable-top merchantable volume equations) ที่สร้างโดยแบบจำลอง (5)-(7) วิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี non-linear regression การคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดในการสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด ใช้วิธีพิจารณาค่า RMSE (root mean square error) และค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนดที่ปรับแก้แล้ว (adjusted coefficient of determination,)

4.การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Model validation)

การทดสอบแบบจำลอง (สมการ) ที่ใช้ประมาณหาปริมาตรส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดและสมการประมาณหาปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ โดยการใช้ชุดข้อมูลที่เป็นอิสระจากชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง (ไม่เป็นข้อมูลชุดเดียวกัน และเก็บตัวอย่างจากแปลงสวนป่าที่ไม่ใช่แปลงที่เก็บข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง) ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบรวบรวมจากสวนป่า 14 สวน ใน 5 จังหวัด ได้แก่ กำแพงเพชร กาญจนบุรี ลพบุรี เลย และอุตรดิตถ์ จำนวนไม้ตัวอย่าง 82 ต้น ทำการทดสอบค่าความแม่นยำ (accuracy) และความเที่ยงตรง (precision) ของการคาดคะเน โดยใช้ค่าทดสอบทางสถิติเพื่อประเมินความแม่นยำและความเที่ยงตรงเชิงปริมาณของแบบจำลอง ดังนี้

$$MRES = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (9)$$

$$MRES\% = 100\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)/n}{\sum \hat{y}_i/n} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2/n} \quad (11)$$

$$RMSE\% = 100\sqrt{\sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2/n}{\sum \hat{y}_i/n}} \quad (12)$$

$$AMRES = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (13)$$

$$AMRES\% = 100\frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|/n}{\sum \hat{y}_i/n} \quad (14)$$

โดย

$MRES$ = mean residuals

$AMRES$ = absolute mean residuals

$RMSE$ = root mean square error

$MRES\%$, $RMSE\%$และ$AMRES\%$ = ค่าสัมพัทธ์ที่คำนวณเป็นร้อยละ(เปอร์เซ็นต์) ของค่าเฉลี่ยของค่าคาดคะเนดังกล่าว

n = จำนวนค่าสังเกต

y_i และ$\widehat{y_i}$ = ค่าสังเกต (ค่าที่วัดได้จริงจากการเก็บข้อมูล) และค่าจากการคาดคะเนตามลำดับ

ในการทดสอบแบบจำลองที่มีจำนวนพารามิเตอร์ (ตัวแปรอิสระ) ของแบบจำลองไม่เท่ากัน จะใช้ค่า AIC (Akaike Information Criterion) เป็นค่าสถิติที่ใช้เป็นบรรทัดฐานในการเปรียบเทียบ (Burnham et al., 2002; Sharma, 2009)

โดย

$AIC = n.\ln(RMSE) + 2p$ .....(15)

Ln= natural logarithm

p = no. of parameter

แบบจำลองที่ให้ AIC ค่าน้อยที่สุด คือ แบบจำลองที่เหมาะสม

ในการทดสอบความเที่ยงตรงของแบบจำลอง จะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการคาดคะเน (mean square error, MS) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความเที่ยงตรงของแบบจำลองด้วย (Zhang, 1997)

$MS = (MRES)^2 + v$ .....(16)

v = ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจากการคาดคะเน (variance of the prediction errors)

ผลการศึกษา

สมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด (total volume equations)

ค่าพารามิเตอร์ (สัมประสิทธิ์)ของตัวคาดคะเน และการเข้ากันได้ระหว่างชุดข้อมูลกับเส้นรีเกรสชั่น (fit statistic) ของสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดที่สร้างจากแบบจำลอง (1)-(4)แสดงใน Table 1ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าสมการที่สร้างจากแบบจำลอง (1)-(4) (n=196) มีนัยสำคัญอย่างยิ่ง ($p<0.001$) และมีคุณลักษณะที่ดีสำหรับนำไปใช้ในการประมาณปริมาตรส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด ค่า RMSE และ R_a^2

ของแบบจำลองทุกแบบมีค่าสูง แบบจำลอง (1) (Figure 1) ให้ค่าทางสถิติดังกล่าวดีที่สุด (RMSE น้อยที่สุด, R_a^2 มากที่สุด) รองลงมาคือแบบจำลอง (2), (3), และ (4) ตามลำดับแบบจำลอง (1) และ (2) ให้ค่า RMSE และ ใกล้เคียงกันมาก (ต่างกันที่ทศนิยมตำแหน่งที่ 4 และ 5 ตามลำดับ) แบบจำลอง (1) ถูกเลือกเป็นอันดับแรก เนื่องจากเหตุผลความเป็นจริงทางชีววิทยา (biological realism) ด้วย (Vt = 0 เมื่อ $DBH^2H = 0$) แบบจำลอง (4) มี DBH เท่านั้นที่เป็นองค์ประกอบของตัวแปรอิสระในขณะที่แบบจำลอง (1) (2) และ (3) มี DBH และ H เป็นองค์ประกอบของตัวแปรอิสระ แสดงให้เห็นว่าความสูงของต้นไม้ (H) มีผลทำให้ความคลาดเคลื่อนของการคาดคะเน (ค่า RMSE) ลดน้อยลงและค่า R_a^2 ของแบบจำลองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

Table 1 Description of *T. grandis* plantations and theirs sample trees used to develop model.

No.	Plantation	Province	Age (year)	Samples (trees)	DBH (cm)	Height (m)
1	Mae My	Lampang	30-39	40	11.1 - 34.6	14.3-21.0
2	MaeKham Mee	Phare	33	15	23.5 - 37.1	16.1-27.1
3	WangChing	Phare	38	20	28.0 - 29.5	22.6-29.2
4	Suwankhuha	Nong Bua Lam Phu	15	8	5.7 - 24.4	6.3-20.13
5	DenDarn	Uttaradit	10	5	11.0 - 23.4	11.7-18.4
6	NaDung	Loei	33	13	18.8 - 42.1	15.2-22.8
7	DongLan	Khon Kaen	9	7	11.2 - 16.1	9.5-15.5
8	ChiengThong	Tak	33	7	11.9 - 23.1	13.9-22.6
9	Rampa	Kam Phaeng Phet	22	9	14.2 - 20.0	12.4-19.5
10	MaeMo	Lampang	34	11	19.6 - 24.7	14.9-22.9
11	HoiRabum	Uthai Thani	38	6	19.2 - 26.7	15.6-23.0
12	Ladyao	Nakhon Sawan	34	12	17.6 - 35.7	14.9-27.2
13	MayMy	Lampang	44	11	21.2 - 26.0	15.1-24.5
14	Farmer	Kam Phaeng Phet	24	15	9.5 - 19.2	9.6-16.6
15	Mae Huad-Mae Ko	Lamphun	35	17	18.7 - 28.7	14.4-20.7

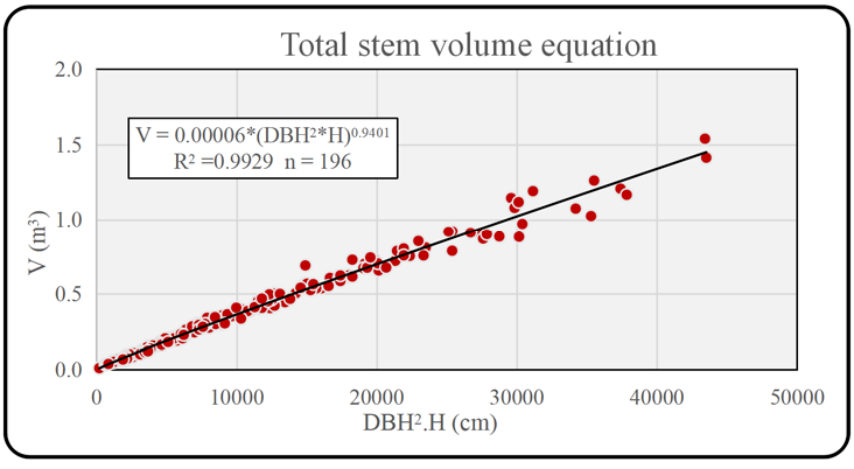

Figure 1 The best regression model for estimating total stem volume.

สมการอัตราส่วนปริมาตร (Volume ratio equations)

สมการอัตราส่วนปริมาตร (*Rd* และ *Rh*) สร้างจากแบบจำลอง (5)-(8) ค่าพารามิเตอร์ (สัมประสิทธิ์) ของตัวคาดคะเน แสดงใน Table 2 และการเข้ากันได้ระหว่างชุดข้อมูลกับเส้นรีเกรสชั่น (fit statistic) ของสมการที่สร้างจากแบบจำลอง (5)-(8) แสดงใน Figures 2-3 จำนวน n ของชุดข้อมูลเท่ากับ 1,092 ชุดข้อมูล (data sets) ได้จากไม้ตัวอย่าง 196 ต้น

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง (5) และ (6) มีคุณลักษณะที่ดีสำหรับนำไปประมาณค่า *Rd* (Volume ratio equations to top diameter limits) ส่วนแบบจำลอง (7) และ (8) มีคุณลักษณะที่ดีสำหรับนำไปประมาณค่า *Rh* (Volume ratio equations to top height limits) เช่นเดียวกันแบบจำลอง (สมการ volume ratio) ทั้งหมดมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง ($p< 0.001$) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง (5) และ (6) ซึ่งเป็นแบบจำลองในการสร้างสมการ volume ratio to top diameter limits พบว่าค่า RMSE ของแบบจำลอง (6) น้อยกว่าแบบจำลอง (5) แต่ค่า R_a^2 ของแบบจำลอง (6) มากกว่าแบบจำลอง (5) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง (6) ดีกว่า แบบจำลอง (5) สำหรับการนำไปสร้างสมการ volume ratio to top diameter limits ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง (7) และ (8) ซึ่งเป็นแบบจำลองในการสร้างสมการ volume ratio to top height limits ผลปรากฏว่าค่า RMSE ของแบบจำลอง (7) น้อยกว่าแบบจำลอง (8) และค่า R_a^2 ของแบบจำลอง (7) มากกว่าแบบจำลอง (8) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง (7) ดีกว่าแบบจำลอง (8) ในการนำไปสร้างสมการ volume ratio to top height limits อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่า RMSE และค่า R_a^2 ระหว่างแบบจำลอง (5) กับ (6) และระหว่าง (7) กับ (8) ปรากฏว่ามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง (5) (6) (7) และ (8) สามารถนำไปพัฒนาสร้างสมการ volume ratio (*Rd* และ *Rh*) ได้เป็นอย่างดี

Table 2 Parameter estimates and fit statistics for total volume equations.

Model	Parameter	Estimate	SE	RMSE	R_a^2	*p* Value
1	β_{11}	0.000063	0.022437	0.032711	0.992898	<0.001
	β_{21}	0.940060	0.005693			
2	β_{12}	0.000063	0.031069	0.032863	0.992863	<0.001
	β_{22}	1.874410	0.027270			
	β_{32}	0.949990	0.043534			
3	β_{13}	0.027732	0.004627	0.039497	0.983300	<0.001
	β_{23}	0.000033	0.000001			
4	β_{14}	-0.051971	0.011393	0.084155	0.924500	<0.001
	β_{24}	0.000823	0.000017			

Remark: SE = standard error of estimate

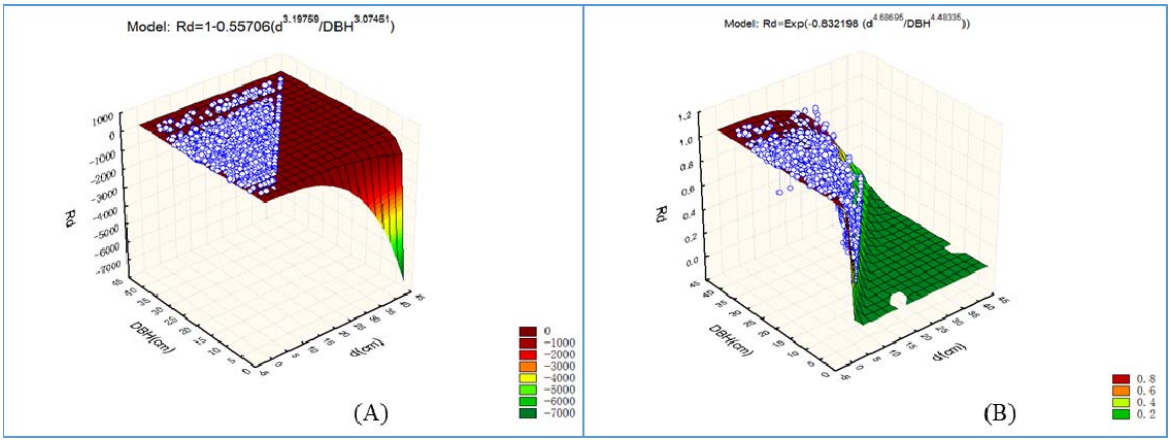

Figure 2 Volume-ratio equation (Rd) for *T. grandis* in Thailand
(A) developed from Burkhart (1977) (model5)
(B) developed from Van Deusen et al.(1981) (model 6).

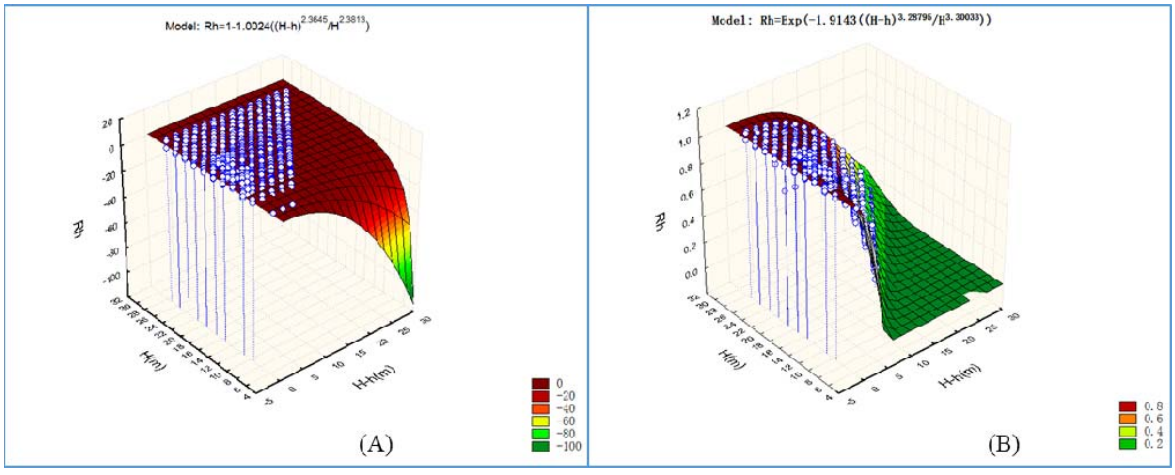

Figure 3 Volume-ratio equation (Rh) for *T. grandis* in Thailand
(A) developed from Cao and Burkhart (1980) (model 7)
(B) (B)developed from Van Deusen et al.(1981) (model 8).

การทดสอบแบบจำลอง

แบบจำลองการประมาณปริมาตรส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด

จากการเก็บตัวอย่างจากสวนป่า 14 สวน (15 แปลงปลูก) จำนวนไม้ตัวอย่าง 82 ต้น คิดเป็น ร้อยละ 41.8 ของจำนวนไม้ตัวอย่างที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 752 ชุดข้อมูล ผลการทดสอบประสิทธิภาพเชิงปริมาณของแบบจำลอง (1) (2) (3) และ (4) ที่จะนำไปใช้ในการสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมด แสดงใน Table3

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่า

แบบจำลอง (1) มีค่า RMSE และค่า RMSE% น้อยที่สุด รองลงมาคือ แบบจำลอง (2) (3) และ (4) ตามลำดับ นั่นคือแบบจำลอง (1) มีความแม่นยำของการคาดคะเนดีที่สุด เมื่อพิจารณาถึงค่า MS ซึ่งแสดงถึงความเที่ยงตรงของการคาดคะเน แบบจำลอง (1) มีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือแบบจำลอง (2) (3) และ (4) ตามลำดับ แม้ว่าค่า AMRES และ AMRES% ของแบบจำลอง (2) จะน้อยกว่าแบบจำลอง (1) แต่ก็มีค่าต่างกันน้อยมาก ค่า AIC ซึ่งเป็นบรรทัดฐานสำคัญในการคัดเลือกสมการที่เหมาะสม ปรากฏว่าแบบจำลอง (1) มีค่า AIC น้อยกว่าแบบจำลอง (2) (3) และ (4) ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าแบบจำลอง (1) มีความแม่นยำและเที่ยงตรงของการคาดคะเนดีที่สุด จึงเป็นแบบจำลองที่นำไปใช้สร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดในการศึกษาครั้งนี้ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบแบบจำลอง (1) และ (2) แตกต่างกันเล็กน้อยมาก ดังนั้นแบบจำลอง (2) ก็สามารถนำไปใช้สร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดได้ดีเช่นกัน สมการที่ได้ตามแบบจำลอง (1) และ (2) คือ

$$Vt = 0.00063\ (DBH^2\ H)^{0.94006}$$

$$Vt = 0.00063\ (DBH^{1.8744}\ H)^{0.94999}$$

แบบจำลองการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้

แบบจำลอง (5)-(8) ได้นำมาใช้ในการสร้างสมการ volume ratio equations to top diameter (or height) limits ดังกล่าวมาแล้ว ในการศึกษานี้ได้ใช้สมการ volume-ratio (*Rd* และ *Rh*) ที่สร้างจากแบบจำลองทั้ง 4 แบบ เพื่อเปรียบเทียบกัน ปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ (*Vd* หรือ *Vh*) คือ ผลคูณของฟังก์ชั่นของสมการอัตราส่วนปริมาตร(Volume-ratio equation)กับสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดที่สร้างจากแบบจำลอง (1) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบสมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้า (Variable-top merchantable volume equations) แสดงใน Table4

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง (5) และ (6) ซึ่งใช้ในการสร้างสมการ volume-ratio to top diameter limits ค่าวิเคราะห์ทางสถิติทุกค่าของแบบจำลอง (6) ให้ผลลัพธ์น้อยกว่าแบบจำลอง (5) ทุกค่าที่วิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสมการ variable-top merchantable volume (*Vd or Vh*) ที่สร้างจากแบบจำลอง (6) ให้ความแม่นยำและความเที่ยงตรงของการคาดคะเนปริมาตรไม้มากกว่าสมการที่สร้างจากแบบจำลอง (5) ในขณะที่แบบจำลอง (7) ให้ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ทางสถิติทุกค่าน้อยกว่าแบบจำลอง (8) แต่อย่างไรก็ตามค่าทางสถิติที่เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง (5) และ (6) และค่าเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง (7) และ (8) แตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าสามารถนำแบบจำลองทั้ง 4 แบบมาใช้สร้างสมการ variable-top merchantable volume ได้ดีทุกแบบจำลองสมการที่ได้จากแบบจำลอง (5)-(8) คือ

$$Vd = [1 - 0.55706\left(\frac{d^{3.19759}}{DBH^{3.07451}}\right)]x\ Vt$$

$$Vd = \exp\left[-0.832198\left(\frac{d^{4.68695}}{DBH^{4.48335}}\right)\right]xVt$$

$$V_{\mathbf{h}} = \left[1 - 1.0024\ \{\frac{(H - \mathbf{h})^{2.3645}}{H^{2.3813}}\}\right]x\ Vt$$

$$V_{\mathbf{h}} = \exp\left[-1.9143\{\frac{(H - \mathbf{h})^{3.2880}}{H^{3.3003}}\}\right]x\ Vt$$

Table 3 Parameter estimates and fit statistics for volume ratio equations.

Model	Parameter	Estimate	SE	RMSE	R_a^2	p Value
5	β_{15}	-0.5571	0.0164	0.051937	0.9627	<0.001
	β_{25}	3.1976	0.0224			
	β_{35}	3.0745	0.0238			
6	β_{16}	0.8322	0.3849	0.048018	0.9681	<0.001
	β_{26}	4.6870	0.0362			
	β_{36}	4.4833	0.0375			
7	β_{17}	-1.0024	0.0253	0.029697	0.9878	<0.001
	β_{27}	2.3645	0.0102			
	β_{37}	2.3813	0.0135			
8	β_{18}	1.9143	0.09484	0.034565	0.9838	<0.001
	β_{28}	3.2880	0.0190			
	β_{38}	3.3003	0.0255			

Table 4 Statistical values of the model validation in this in this study to estimate total stem volume for *T.grandis* in Thailand.

Model	MRES	MRES (%)	RMSE	RMSE (%)	AMRES	AMRES (%)	AIC	MS
(1)	0.003853	1.143608	0.026330	4.536162	0.017676	5.246703	-246.96	0.026344
(2)	0.002808	0.830818	0.026467	4.552797	0.017533	5.188073	-244.60	0.026475
(3)	0.002262	0.668239	0.027120	4.661264	0.019526	5.768411	-244.92	0.027125
(4)	0.001465	0.431756	0.038767	6.655461	0.027601	8.134829	-220.26	0.038770

Table 5 Statistical values of the model validation in this study to estimate merchantable stem volume for *T. grandis.*

Model	MRES	MRES (%)	RMSE	RMSE (%)	AMRES	AMRES (%)	AIC	MS
(5)	0.001903	0.673400	0.034478	6.485001	0.022491	7.956798	- 2,721.62	0.034482
(6)	-0.000150	-0.052768	0.032819	6.150589	0.021009	7.379101	- 2,761.57	0.032819
(7)	0.039410	1.404381	0.021016	3.967328	0.013897	4.952341	- 3,122.58	0.021032
(8)	0.001764	0.623608	0.022809	4.289092	0.015343	5.425494	- 3,056.29	0.022812

สรุปผลการศึกษา

1. แบบจำลองที่นำเสนอโดย Burkhart (1977), Cao and Burkhart (1980) และ Van Deusen *et al.* (1981) สามารถนำมาใช้สร้างสมการอัตราส่วนปริมาตร(volume ratio equations) สำหรับการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สักจากสวนป่าของประเทศไทยได้เป็นอย่างดี

2. Volume ratio model (Rd)ในรูปแบบ exponential (Van Deusen *et al.*,1981) เป็นแบบจำลองที่ให้ผลการคาดคะเนปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าที่ขนาดจำกัดของเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นใดๆ (variable-top diameter limits) ได้ดีที่สุด ส่วนในการคาดคะเนปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าที่ขนาดจำกัดของความยาวของลำต้นใดๆ (variable-top height

limits) แบบจำลองของ Cao and Burkhart (1980) ให้ผลการคาดคะเนที่ดีที่สุด

3. ความถูกต้องของสมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ที่ขนาดจำกัดใดๆ (variable top merchantable volume) ขึ้นอยู่กับความแม่นยำและเที่ยงตรงของสมการประมาณปริมาตรไม้ส่วนที่เป็นลำต้นทั้งหมดด้วย

4. ผลการทดสอบแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ของการคาดคะเนปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ ให้ค่า RMSE% และ MRES% น้อยกว่า 10% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบ สามารถนำไปใช้ในการคาดคะเนปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สักในสวนป่าของประเทศไทยได้ดี โดยมีความแม่นยำและความเที่ยงตรงของการคาดคะเนสูงเป็นที่น่าพอใจ

คำนิยม

ขอขอบพระคุณเจ้าของสวนป่าสักทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณนักวิจัยจากศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์การเกษตรนานาชาติแห่งประเทศญี่ปุ่นที่ช่วยในการเก็บข้อมูลบางส่วน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Burkhart, H.E. 1977. Cubic foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. Southern Journal of Applied Forestry 1(2): 7-9.

Burnham K.P. and D.R. Anderson. 2002. Model selection and inference. A practical information-theoretic approach. New York, USA: Springer-Verlag.

Cao Q.V. and H.E.Burkhart. 1980. Cubic-foot volume of loblolly pine to any height limit. South J Appl For 4:166-168.

Schumacher F.X. and F.S. Hall. 1993. Logarithmic expression of timber tree volume. J. Agric Res. 1933 vol.47: 719-734.

Sharma R.P. 2009. Modelling height-diameter relationship for Chir pine tree. Banko Janakari,19:3-9.

Spurr, S.H. 1952. Forest inventory. Illus, New York, Ronald Press Co. 476 pp.

Van Deusen, P.C., A.D. Sullivan and T.G. Matney. 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. J. Appl. For. 5(4):186-189.

Warner, A.J., M. Jamroenprucksa and L.Puangchit. 2016. Development and evaluation of teak (TectonagrandisL.f.) taper equations in northern Thailand. Agr. Nat. Resour. 50(2016): 362-367.

Zhang, L. 1997. Cross-validation of non-linear growth functions for modelling tree height-diameter relationshop. Ann.Bot. 79:251-257.