



สถานะและโพแทสเซียมบัฟเฟอร์ในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย  
Status and Buffering Potassium in Rubber Growing Soils  
in Southern Thailand

อารีรัตน์ ชูเมฆา  
Arirat Chumekha

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Science in Soil Resources Management  
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์      สถานะและโพแทสเซียมบัพเฟอร์ในดินปลูกยางพาราในภาคใต้  
 ของประเทศไทย

ผู้เขียน              นางสาวอารีรัตน์ ชูเมฆา

สาขาวิชา            การจัดการทรัพยากรดิน

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

**คณะกรรมการสอบ**

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ พูนภักดี)

.....ประธานกรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีราภรณ์ อินทสาร)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ พูนภักดี)

.....  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)

.....กรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)

.....กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญตา ขาวมี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
 ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน

.....  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวินพัฒน์ สิริกานติโสภณ)  
 รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ พูนภักดี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นางสาวอารีรัตน์ ชูเมฆา)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวอารีรัตน์ ชูเมฆา)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	สถานะและโพแทสเซียมบัพเฟอร์ในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ ของประเทศไทย
ผู้เขียน	นางสาวอารีรัตน์ ชูเมฆา
สาขาวิชา	การจัดการทรัพยากรดิน
ปีการศึกษา	2566

### บทคัดย่อ

ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีโพแทสเซียม (K) ที่เป็นประโยชน์ต่ำ โดยความเป็นประโยชน์ของ K ขึ้นอยู่กับรูปของ K ในดิน ความสามารถในการตรึงและปลดปล่อย K ในดิน รวมทั้งสมบัติต่าง ๆ ของดิน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อเปรียบเทียบรูปของ K ในดินที่ถูกแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (single leaching extraction (SLE) และการสกัดแบบตามลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP) 2) เพื่อประเมินความจุบัพเฟอร์ในดินปลูกยางพารา และ 3) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของ K ในดินและการเคลื่อนย้าย K จากดินสู่พืชโดยเก็บดินปลูกยางพาราในภาคใต้ตามกลุ่มเนื้อดิน คือ ทราย ปานกลาง และละเอียด นำมาศึกษารูป K และความเข้มข้นของ K ตามวิธี SLE และ SEP รวมทั้งหาความสัมพันธ์กับสมบัติดิน จากนั้นนำไปศึกษาการตรึงและการปลดปล่อย K ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงรูป K ในดินเมื่อปลูกกล้วยพารา ผลการศึกษา พบว่า ความเข้มข้นของ K รูปต่าง ๆ ในดินมีค่าสูงในดินเนื้อละเอียด > ดินเนื้อปานกลาง > ดินเนื้อทราย รูปของ K ที่สกัดด้วยวิธี SLE และ SEP ไม่เพียงแต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงกับอินทรีย์วัตถุ ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และอนุภาคดินเหนียว แต่ K รูปต่าง ๆ ที่สกัดได้ทั้ง 2 วิธี ยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกกันสูง โดยพบว่า ผลรวมของ Exch-K กับ Car-K มีความสัมพันธ์กับ  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ( $r^2=0.94$ ) นอกจากนี้ ผลรวมของ Oxide-K กับ OM-K มีความสัมพันธ์กับ Fixed-K ( $r^2=0.84$ ) และ Res-K พบความสัมพันธ์สูงกับ Min-K ( $r^2=0.83$ ) การตรึง K ในดินเกิดได้ดีในกลุ่มดินเนื้อละเอียด ดินทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินมีค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานโพแทสเซียม ( $\text{BC}_K$ ) ในช่วง 0.7-0.8 ดังนั้น ร้อยละ 70-80 ของ ปุ๋ย K ที่ใส่จะอยู่ในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ในขณะที่ร้อยละ 20-30 ของ K ที่ใส่ปุ๋ยจะถูกตรึงไว้ในดิน ดินปลูกยางพารามีศักยภาพในการปลดปล่อย K ได้ต่ำ โดยดินเนื้อละเอียดมีการตรึงและปลดปล่อยสูงกว่าดินเนื้อปานกลาง และทราย ตามลำดับ การใส่ปุ๋ย K ในดินทำให้การเจริญเติบโตของพืชดีและเพิ่มการดูดใช้ K และ N แต่เมื่อใส่ปุ๋ย K ในปริมาณสูง พบว่า ยางพาราดูดใช้ Ca และ Mg ลดลง เมื่อประเมินรูปของ K ในดินหลังปลูกกล้วยพารา พบว่า K ส่วนใหญ่อยู่ในรูป Res-K > Exch-K > Car-K > Oxide-K > OM-K และพบว่า ความเข้มข้นของ Exch-K และ Car-K เพิ่มขึ้น ดังนั้น SEP สามารถนำไปประเมิน K ในรูปที่เป็นประโยชน์ได้สอดคล้องกับการประเมินแบบ SLE ทั้งนี้ดินปลูกยางพาราในภาคใต้ควรใส่ปุ๋ย K ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์เพื่อให้ดินมีระดับ K เพียงพอต่อความต้องการของยางพารา

<b>Thesis Title</b>	Status and Buffering Potassium in Rubber Growing Soils in Southern Thailand
<b>Author</b>	Miss. Arirat Chumekha
<b>Major Program</b>	Soil Resources Management
<b>Academic Year</b>	2023

### ABSTRACT

The soils in southern Thailand have low content of available K. The availability of soil K depends on the K speciation, K fixation, K release, and soil properties. The objectives of this study were 1) to compare soil K speciation based on its bioavailability (single leaching extraction; SLE) and sequential extraction process (SEP), 2) to assess the K buffer capacity in rubber growing soils, and 3) to investigate the K transformation in soil and soil K translocation in soil to plant. Soil profiles were selected different textural groups as follows; coarse, medium and fine texture. Soil K speciation was investigated by SLE and SEP and correlation with soil properties. K fixation, K release, and soil K transformation after rubber budding grown were evaluated. The results showed that the concentration of soil K speciation was high in fine > medium > coarse soil textural groups. Soil K speciation obtained by SLE and SEP not only exhibited a strong positive correlation with organic matter, cation exchange capacity, and clay particles, but also exhibited a high degree of correlation among themselves. The summation of Exch-K and Car-K was highly correlated with  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ( $r^2=0.94$ ). Moreover, the summation of Oxide-K and OM-K was highly correlated with Fixed-K ( $r^2=0.84$ ), and Res-K was highly correlated with Min-K ( $r^2=0.83$ ). K fixation was highest in fine textural soil. In all textural groups, the buffering coefficient for K ( $\text{BC}_K$ ) was 0.7-0.8. Therefore, 70-80% of K applied were in Sol-K and Exch-K, while 20-30% was fixed in the soil. Rubber plantation soils were low K release potential. Fine soil texture had higher K fixation and release capacity than medium and coarse, respectively. K fertilizer application in soils promoted plant growth, and increased K and N uptake. While, high dosages of K fertilizer application inhibited Ca and Mg uptake in plant. Soil K speciation after rubber budding grown was high in Res-K > Exch-K > Car-K > Oxide-K > OM-K. The concentration of Exch-K and Car-K increased. Therefore, SEP can be used to evaluate availability K as SLE. Rubber plantation in southern Thailand, the combination of K fertilizer and organic fertilizer should be applied for soil K sufficiency level for rubber trees requirement.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ พูนภักดี อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.จำเริญ อ่อนทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมไปถึง ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราภรณ์ อินทสาร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญตา ขาวมี เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา สละเวลามาสอบวิทยานิพนธ์ และช่วยเหลือชี้แนะ แนวทาง รวมถึงข้อคิดและคำสอนต่าง ๆ ที่มอบให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ พูนภักดี และ รองศาสตราจารย์ ดร. จำเริญ อ่อนทอง อีกครั้งที่ให้โอกาสและสนับสนุนในการศึกษาในครั้งนี้ และเป็นผู้ให้กำลังใจจน แรงผลักดัน

ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาเอกปรัชญาศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยสั่งสอนและให้ความรู้ทั้งใน เรื่องทางวิชาการและความรู้ทั่วไป

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ชาย สนับสนุนโอกาสทางการศึกษา และ บุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนขอบคุณพี่แชมป์ พี่เจน น้องนน และพี่ฝ่าย ที่ให้ความช่วยเหลือให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

อารีรัตน์ ชูเมฆา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการรูปภาพ	(12)
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร</b>	
ความสำคัญและการปลูกยางพาราในประเทศไทย	4
สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปลูกยางพารา	4
ความสำคัญของโพแทสเซียมกับยางพารา	7
รูปโพแทสเซียมในดิน	8
การต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดิน	10
ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อรูปของโพแทสเซียมในดิน	11
การประเมินรูปของโพแทสเซียมในดิน	13
การได้รับและสูญเสียโพแทสเซียมจากดิน	19
<b>บทที่ 3 การกระจายตัวของรูปโพแทสเซียมในเนื้อดินที่แตกต่างกัน</b>	
<b>ในปลูกยางพาราภาคใต้ของไทย</b>	
บทนำ	21
อุปกรณ์และวิธีการ	23
ผลการทดลอง	27
วิจารณ์ผลการทดลอง	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	39



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 การตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย</b>	
บทนำ	41
อุปกรณ์และวิธีการ	42
ผลการทดลอง	44
วิจารณ์ผลการทดลอง	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	53
<b>บทที่ 5 สมดุลโพแทสเซียมและการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ     ในดินปลูกกล้วยพาราในภาคใต้ของประเทศไทย</b>	
บทนำ	54
อุปกรณ์และวิธีการ	56
ผลการทดลอง	59
วิจารณ์ผลการทดลอง	71
สรุปและข้อเสนอแนะ	76
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	78
อ้างอิง	81
ประวัติผู้เขียน	98

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	Methods and reagents for soil potassium extraction (Jone, 2001).	16
3.1	Universal Transverse Mercator (UTM) coordinates of the sampling areas.	23
3.2	Sequential extraction procedure for K fractionation.	26
3.3	Physicochemical properties of soil samples.	27
3.4	K speciation using single leaching extraction.	29
3.5	K speciation using sequential extraction process.	29
3.6	The correlation coefficient (r) between K speciation based on bioavailability and soil properties.	32
3.7	The correlation coefficient (r) between K speciation based on sequential extraction process and soil properties.	33
3.8	The correlation coefficient (r) between K speciation extracted using single leaching process and sequential extraction process.	34
3.9	The correlation coefficient (r) between K speciation based on SLE and SEP.	35
4.1	Mineralogy of clay fractions in studied soils.	45
4.2	Range, mean, and standard deviation (SD) value of soil samples.	46
4.3	Potassium speciation in coarse medium and fine textural groups.	47
4.4	Percentage of fixed K in various different added K concentration.	47
4.5	Cumulative K release in coarse medium and fine textural soil groups.	48
4.6	Percentage of K release from total K concentration.	49

ตารางที่		หน้า
4.7	Average the amount of fixed potassium and released potassium in various K added in soils.	52
5.1	Mixture of fertilizer solution A and B.	58
5.2	Soil chemical properties of coarse, medium, and fine textural groups.	60
5.3	K speciation in soils before rubber budding cultivation.	60
5.4	Effect of K fertilizer application on fresh and dried weigh of rubber tree.	64
5.5	Effect of K fertilizer application on N and P uptake.	66
5.6	Effect of K fertilizer application on Ca and Mg uptake.	67
5.7	Different K fertilizer rate on K uptake and soil K balance.	71

## รายการรูปภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	Potassium speciation in soil.	10
2.2	Sequence of extraction of soil K speciation.	19
3.1	K fractionation based on bioavailability in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural group and the average of K fractionation in soil textural group (d).	30
3.2	K fractionation based on sequential extraction process in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural group and the average of K fractionation in soil textural group (d).	31
3.3	K fractionation based on bioavailability (a) and K fractionation based on sequential extraction process (b) the average of K fractionation in different soil order.	31
3.4	The correlation coefficient (r) between K speciation by SLE and SEP.	38
4.1	Buffer coefficient for K (a), and the average of cumulative K release in different soil textural groups (b).	48
5.1	Effect of K application on the growth of rubber tree grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soils.	61
5.2	Effect of K fertilizer on the height of rubber tree grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soils.	62
5.3	Effect of K fertilizer on the stem diameter of rubber tree grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soils.	63
5.4	Effect of K fertilizer application on K uptake in rubber tree budding grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soil.	68
5.5	Effect of K application on K uptake in particle of rubber tree budding grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soil.	69
5.6	K speciation in coarse, medium, and fine texture soils in Exch-K (a), Car-K (b), Oxide-K (c), OM-K (d) and Res-K (e) after plantation	70

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

โพแทสเซียม (K) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชดูดใช้โพแทสเซียมจากดินในรูปของโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) พืชโดยทั่วไปมีความเข้มข้นของ K ร้อยละ 0.5-6 ของน้ำหนักแห้ง (Havlin *et al.*, 2005) โพแทสเซียมมีบทบาทในการช่วยในการควบคุมการเปิดปิดของปากใบ กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ช่วยในการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาลในเซลล์พืช ดังนั้น จึงมีบทบาทอย่างมากในการช่วยปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มปริมาณของผลผลิตของพืช เช่นเดียวกับในยางพาราที่มีรายงานว่า ธาตุโพแทสเซียมมีหน้าที่ในการควบคุมสมดุลน้ำในพืชและช่วยให้ผลผลิตน้ำยางพาราเพิ่มสูงขึ้น (Joseph *et al.*, 1998) นอกจากนี้ เมื่อยางพาราได้รับโพแทสเซียมที่เพียงพอพบว่า ทำให้การสร้างเปลือกงอกใหม่เร็วขึ้น (Kungpisdan, 2009)

โพแทสเซียมในดินแบ่งออกตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชถูกแบ่งออกเป็น 4 รูป คือ 1) โพแทสเซียมในสารละลายดิน (water soluble K) 2) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) 3) โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (non-exchangeable K) และ 4) โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (mineral K) สำหรับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อการดูดใช้ของพืช (available K) คือ โพแทสเซียมในสารละลายดิน และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Brady and Weil, 2008) โพแทสเซียมทั้ง 2 รูปนี้มีอยู่น้อยในดินคิดเป็นร้อยละ 0.1-2 ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน ส่วนโพแทสเซียมที่ถูกตรึงซึ่งอยู่ในระหว่างหลีบของแร่ดินเหนียวเป็นส่วนที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที โพแทสเซียมที่ถูกตรึงเป็นส่วนที่ค่อย ๆ ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์แก่พืช โพแทสเซียมในรูปนี้มีปริมาณร้อยละ 1-10 ส่วนโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่เป็นโพแทสเซียมที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันทีมีสูงถึงร้อยละ 90-98 ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Havlin *et al.*, 2005) อย่างไรก็ตาม โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่จะเป็นประโยชน์ให้พืชดูดนำไปใช้ได้ก็ต่อเมื่อแร่นั้นมีการผุพังสลายตัวเสียก่อน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวอาจใช้เวลานานและอาจไม่ทันต่อการเจริญเติบโตของพืชในฤดูกาลปลูก นอกจากนี้ ดินเนื้อละเอียดมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และโพแทสเซียมทั้งหมดสูงกว่าในดินเนื้อหยาบ (Havlin *et al.*, 2005) ซึ่งเนื้อดินจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน (Brady and Weil, 2008) และดินปลูกยางพารามีทั้ง ดินเนื้อหยาบ และละเอียด (Poonpakdee, 2013; Rubber Research Institute,

2018) ดังนั้นจึงส่งผลให้ดินมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนระดับของโพแทสเซียมในดินได้แตกต่างกัน

โพแทสเซียมในดินทั้ง 4 รูปลูกอยู่ในสถานะที่สมดุลกัน กล่าวคือ ดินมีสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดิน (potassium buffering capacity) เมื่อโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดลงเนื่องจากการดูดกินของพืช หรือสูญเสียออกไปจากดินโดยการกร่อน การชะละลายและไม่มีสารใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปเพิ่มเติม จะส่งผลให้โพแทสเซียมที่ถูกตรึงมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาสู่ดินเพื่อเป็นการรักษาสมดุลระหว่างของโพแทสเซียม (Brady and Weil, 2008; Havlin *et al.*, 2005) ในทางกลับกัน เมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปในดินซึ่งเป็นการเพิ่มระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมดุลรูปของโพแทสเซียมในดิน จะมีการต้านทานกระบวนการดังกล่าวโดยการตรึงโพแทสเซียมส่วนหนึ่งไว้ในระหว่างผลึกของแร่ดินเหนียวซึ่งกระบวนการนี้เป็นการเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกตรึงในดิน อย่างไรก็ตามโพแทสเซียมที่ถูกตรึงไว้นี้ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชอีกครั้งเมื่อดินมีระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำ

มีรายงานสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient;  $r$ ) ของโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินปลูกยางพาราที่ปลูกในที่ลุ่มและที่ดอนในจังหวัดสงขลา พบว่า พบความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมในสารละลายดินและโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้กับโพแทสเซียมที่ถูกตรึงในดิน (Poonpakdee *et al.*, 2013) เช่นเดียวกับที่มีรายงานว่า พบความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชกับโพแทสเซียมในสารละลายดินและโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชกับโพแทสเซียมที่ถูกตรึงในดินอันดับอัลทิซอลส์ (Darunsontaya *et al.*, 2019) ซึ่งเป็นอันดับดินหลักที่พบมากในประเทศไทย ดังนั้น การศึกษารูปของโพแทสเซียมในดินจึงมีความสำคัญเพื่อเป็นดัชนีในการประเมินศักยภาพของดินที่จะเป็นแหล่งปลดปล่อยโพแทสเซียมจากรูปที่เป็นแหล่งสำรองในดินให้ออกมาอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ การเข้าใจถึงความสามารถของดินในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงระดับโพแทสเซียมหรือที่เรียกว่าความจุ้ฟเฟอร์โพแทสเซียมในดินซึ่งประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กลไกการตรึงและกลไกการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดิน จึงมีความสำคัญในการจัดการปุ๋ยโพแทสเซียมให้แก่ยางพาราโดยเฉพาะในสภาวะปัจจุบันที่ปุ๋ยมีราคาแพง เพื่อให้การใช้ปุ๋ยมีประสิทธิภาพต่อความต้องการของยางพารา

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษารูปของโพแทสเซียม และความสัมพันธ์ของโพแทสเซียมในดินและที่ ยางพาราคุณนำไปใช้
- 2) เพื่อประเมินความจุบัพเฟอร์ในดินปลูกยางพารา
- 3) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียมในดินและการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมจาก ดินสู่พืช
- 4) เพื่อประเมินสมมูลรูปของโพแทสเซียมในดินกับการดูใช้โพแทสเซียมของพืช

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ที่มีการปลูกยางพารา ในพื้นที่ภาคใต้ ได้แก่ สงขลา พัทลุง สุราษฎร์ธานี จำแนกออกเป็น 3 กลุ่มเนื้อดิน คือ ดินกลุ่มเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียด โดยนำดินมาวิเคราะห์รูปโพแทสเซียมด้วยวิธีการสกัดแบ่งตามความเป็นประโยชน์ของพืช และสกัดแบบลำดับขั้น นำรูปโพแทสเซียมทั้ง 2 วิธีการ มาหาความสัมพันธ์โพแทสเซียมรูปต่าง ๆ กันรวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างรูปของโพแทสเซียมในดินกับสมบัติดิน จากนั้นนำดินไปศึกษาศักยภาพการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียม หลังจากนั้นทดลองปลูกกล้วยา โดยใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในระดับต่าง ๆ เพื่อประเมินการเจริญเติบโต การเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียม และศึกษาการเคลื่อนย้ายโพแทสเซียมในดินรูปต่าง ๆ รวมถึงประเมินสมมูลโพแทสเซียมในดินและที่กล้วยาคุณนำไปใช้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบสถานะ และปริมาณของโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินปลูกยางพาราและสามารถประเมินความสามารถของดินในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงระดับของโพแทสเซียมในดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียดเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินและปุ๋ย และนำไปสู่การจัดการการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมกับดินปลูกยางพาราในภาคใต้

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 ความสำคัญและการปลูกยางพาราในประเทศไทย

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2564 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารา 24.46 ล้านไร่ (Office of Agricultural Economics, 2021) ประเทศไทยได้ส่งออกสินค้ายางพาราเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ซึ่งในช่วงปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีสถิติการส่งออกจำนวน 2.77 ล้านตัน ซึ่งสร้างมูลค่าเฉลี่ยให้กับประเทศไทยกว่า 116,397 ล้านบาท (Office of Agricultural Economics, 2020) มีการปลูกยางพาราทั่วทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะทางภาคใต้โดยมีพื้นที่ปลูก 14.19 ล้านไร่ รองลงมาคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคเหนือ คิดเป็นพื้นที่ 6.23, 2.51 และ 1.54 ล้านไร่ ตามลำดับ และจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีพื้นที่ปลูกเป็นจำนวนมากที่สุดของประเทศ มีพื้นที่ประมาณ 2.36 ล้านไร่ (Office of Agricultural Economics, 2021)

น้ำยางพารา (latex) ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากท่อน้ำเลี้ยงอาหารจากส่วนของเปลือกต้นยางพารา สามารถสร้างรายได้กับเกษตรกรและเกิดการจ้างแรงงาน โดยในปี พ.ศ. 2562 ภาคใต้ส่งออกยางพารา นับเป็นรายได้มูลค่ารวม 130,180 ล้านบาท และยังเป็นสินค้าที่สำคัญที่สุดในการส่งออกมากกว่าสินค้าประเภทอื่น ๆ (Bank of Thailand, 2020) การผลิต การใช้ และการส่งออกของยางไทย มีศักยภาพการผลิตมากกว่าปีละ 4 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2558-2560 ประเทศไทยมีการผลิตยางพาราเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง คิดเป็นปริมาณ 4,429 ล้านตัน เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 2.36 ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว (Rubber Division, 2015)

#### 2.2 สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการปลูกยางพารา

ยางพาราเป็นพืชที่สามารถปรับตัวกับสภาพแวดล้อมได้ดี จะสังเกตได้ว่าสามารถปลูกยางพาราได้เกือบทุกภาคของประเทศไทย ประเทศไทยมีสภาพอากาศร้อนชื้น ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับแถบกลุ่มน้ำเมซอน ประเทศบราซิล ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดยางพารา โดยเฉพาะทางภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทยเป็นพื้นที่ปลูกยางเดิม และในปัจจุบันได้มีการขยายแหล่งปลูกไปยังแหล่งปลูกยางใหม่ นั่นคือ ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคเหนือ ทั้งนี้การปลูกยางพาราให้ได้ผลผลิตสูงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ได้แก่



**2.2.1 พันธุ์ยาง** ยางพาราแต่ละพันธุ์มีกระบวนการเมแทบอลิซึมที่แตกต่างกัน ถือเป็นลักษณะเฉพาะของพันธุ์นั้น ๆ จึงส่งผลให้ยางพาราในแต่ละพันธุ์มีศักยภาพในการสร้างน้ำยางได้แตกต่างกัน โดยพันธุ์ยางแนะนำตามผลผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

- 1) ยางพารากลุ่ม 1 ให้ผลผลิตน้ำยางสูง เช่นพันธุ์ยาง RRIT 251, RRIT 226, BPM 24, RRIM 600
- 2) ยางพารากลุ่ม 2 ให้ผลผลิตทั้งน้ำยางและเนื้อไม้สูง เช่นพันธุ์ยาง RRII 118, PB 235, PB 255, PB 260
- 3) ยางพารากลุ่ม 3 ให้ผลผลิตเนื้อไม้สูง เช่นพันธุ์ยาง ฉะเชิงเทรา 50, AVROS 2037, BPM 1

ทั้งนี้ศักยภาพการให้ผลผลิตเนื้อยางแห้งในระยะเวลา 10 ปี ของพันธุ์ RRIT 251 ซึ่งเป็นพันธุ์ให้ผลผลิตน้ำยางสูง ให้เนื้อยางแห้งเฉลี่ย 339 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี เทียบกับพันธุ์ให้ผลผลิตเนื้อไม้สูงอย่างพันธุ์ BPM 1 ให้เนื้อยางแห้งเฉลี่ยเพียง 276 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี (Rubber Research Institute, 2018) ดังนั้น การยางแห่งประเทศไทยจึงมีการส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกยางพาราพันธุ์ที่ให้ผลผลิตน้ำยางสูงและพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยได้แก่ RRIT 251 และ RRIM 600

**2.2.2 สภาพพื้นที่และสภาพภูมิอากาศ** ความเหมาะสมของพื้นที่ต้องมีความลาดเทน้อยกว่า 35 องศา หากมีความลาดเทเกิน 15 องศา ควรจัดทำเป็นขั้นบันได เนื่องจากพื้นที่ที่มีความลาดเทสูงจะส่งผลให้เกิดกระบวนการชะละลายได้ง่ายทำให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารในดิน และพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับปลูกยางพาราควรจะสูงจากระดับน้ำทะเลไม่เกิน 600 เมตร เพราะส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นยางช้า ทั้งนี้ระดับความสูงของสภาพพื้นที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของยางพารา โดยพบว่า ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น 100 เมตร ทำให้อุณหภูมิลดลง 0.5 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ลดลงส่งผลให้ต้นยางชะงักการเจริญเติบโต โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของยางพาราควรอยู่ที่ 26-30 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงไม่ควรปลูกยางที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส (Rubber Research Institute, 2018)

**2.2.3 เนื้อดิน** เนื้อดินเป็นสมบัติทางฟิสิกส์ ซึ่งจะมีผลควบคุมสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ ของดิน เช่นการระบายน้ำ เนื้อดินจะบ่งบอกถึงขนาดความละเอียดของอนุภาค ที่เป็นส่วนประกอบส่วนอนินทรีย์ของดิน เนื้อดินแบ่งแบบคร่าว ๆ โดยทั่วไปได้เป็น 3 ประเภท คือ ดินเหนียว ยาบ ดินเหนียวปานกลาง และดินเหนียวละเอียด (Department of Soil Science, 2005) ในการแนะนำการใช้ปุ๋ยกับดินปลูกยางพาราแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ดินปลูกยางพาราในกลุ่มดินร่วนเหนียวและกลุ่มดินร่วนทราย การยางแห่งประเทศไทยแนะนำปุ๋ยผสมสำหรับยางก่อนเปิดกรีดในเขตปลูกยางใหม่ สูตร

20-10-12 กับดินร่วนเหนียวปุ๋ยผสมสูตร 20-10-17 กับดินร่วนทราย และสูตร 20-8-20 สำหรับดินร่วนเหนียวและร่วนทรายในเขตปลูกยางเดิม (Rubber Research Institute, 2018) โดยทั่วไปแล้วดินเหนียวมีความสามารถในการดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้น้อย ดินทรายโดยทั่วไปจึงมีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ มีรายงานการปลูกยางพาราในดินทราย พบว่า ดินทรายมีธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่ำ การระบายน้ำดีและในฤดูแล้งดินจะแห้ง ส่งผลให้ยางพารามีการเจริญเติบโตช้า แคระแกรน และเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ช้ากว่ายางพาราที่ปลูกในดินทั่วไปหากไม่มีการจัดการความอุดมสมบูรณ์ของดินอย่างเหมาะสม (Chaipanich *et al.*, 2004) มีรายงานดินปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า มีความเหมาะสมต่อการปลูกยางพาราในระดับต่ำ ดินเป็นดินทรายและมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นรอบวงของลำต้นยางพาราที่ศึกษาในจังหวัดขอนแก่น และบึงกาฬมีค่า 16.4-17.5 ซม. และ 27.7-33.8 ซม. ตามลำดับ (Wiriyakitnatekul, 2016) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมวิชาการเกษตรได้กำหนดไว้สำหรับยางพาราที่อายุ 5 ปี คือ 36 ซม. ทั้งนี้พื้นที่ที่ปลูกยางพาราของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวและกลุ่มดินเนื้อปานกลาง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นหลายเนื้อดิน โดยดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) เป็นเนื้อดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกยางพารา (Surawanit, 2011)

**2.2.4 ความเป็นกรด-ด่างของดิน** ถึงแม้ว่าพีเอชจะไม่ได้ส่งผลต่อยางพาราโดยตรง แต่เป็นปัจจัยที่ควบคุมกิจกรรมต่าง ๆ ในดิน เช่น ควบคุมความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร ดินที่มีพีเอชสูงพีเอชอาจแสดงอาการขาดจุลธาตุรวมถึงฟอสฟอรัสเนื่องจาก ฟอสเฟตไอออนในดิน ( $PO_4^{2-}$ ) จะตกตะกอนกับแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) หรือแมกนีเซียมไอออน ( $Mg^{2+}$ ) ส่งผลให้ความเป็นประโยชน์ลดลง ในทางกลับกันหากดินมีพีเอชต่ำ เหล็กและอะลูมิเนียมจะละลายออกมามาก และตกตะกอนกับฟอสเฟตไอออนได้เช่นกัน นอกจากนั้น พีเอชดินยังควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน หากในทางปฐพีวิทยาแล้วค่าความเป็นกลางของปฏิกิริยาดินอยู่ช่วง 6.6 -7.3 (Department of Soil Science, 2005) อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่ายางพาราสามารถเจริญเติบโตได้ดีดินที่มีพีเอช อยู่ในช่วง 3.8- 6.0 (Karthikakuttyamma *et al.*, 2000) สอดคล้องกับที่มีรายงานว่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการปลูกยางพาราในประเทศไทยควรมีสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ อยู่ในช่วง 4.0 – 5.5 (Kungpisdan, 2008)

**2.2.5 ความลึกดิน** ยางพาราเป็นพืชที่มีรากแก้ว ความลึกของดินที่เหมาะสม ต้องไม่ต่ำกว่า 100 เซนติเมตร ไม่มีชั้นดินดาน ชั้นหินแข็ง ชั้นศิลาแลง หรือชั้นหินปูนที่จับเป็นแผ่นแข็ง (Chaipanich *et al.*, 2004) ซึ่งจะขัดขวางการเจริญเติบโตของพืช และจะขัดขวางการดูดอาหารของรากพืช นอกจากนั้นไม่เป็นที่ลุ่มน้ำขังหรือพื้นที่นา

**2.2.6 ปริมาณน้ำฝน** เขตที่เหมาะสมมากสำหรับยางพารา ควรมีปริมาณน้ำฝนอยู่ที่ 1,500-2,200 มิลลิเมตรต่อปี มีช่วงแล้ง 1-3 เดือน อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำฝนไม่ควรน้อยกว่า 1,250 มิลลิเมตรต่อปี และไม่ควรจะมีช่วงแล้งเกิน 3-4 เดือน การกระจายตัวของฝนดี ถ้ามีปริมาณน้ำฝนมากเกินไปไม่สามารถกรีดยางซึ่งส่งผลกระทบต่อผลผลิตได้ (Rubber Research Institute, 2018)

### 2.3 ความสำคัญของโพแทสเซียมกับยางพารา

การปลูกยางให้ต้นเจริญเติบโตได้ดี และให้ผลผลิตน้ำยางสูง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ไม่เพียงแต่พันธุ์ยาง หรือความเหมาะสมของพื้นที่ แต่การจัดการธาตุอาหารเป็นสิ่งสำคัญ โดยธาตุอาหารจะนำไปสร้างมวลของต้นในแต่ละระยะการเจริญเติบโต ธาตุอาหารหลักที่จำเป็นมากสำหรับพืช ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มีรายงาน ผลผลิตน้ำยาง 1 ต้น มีการสูญเสียไนโตรเจน 20 ฟอสฟอรัส 5 และโพแทสเซียม 25 กิโลกรัม (Rubber Research Institute, 2018) ซึ่งโพแทสเซียมเป็นธาตุ มีความสำคัญต่อกระบวนการทางสรีระวิทยา มีหน้าที่ช่วยในกระบวนการลำเลียงแป้งและน้ำตาลใช้ในการเจริญเติบโตของพืช ทั้งนี้ส่งผลไปยังผลผลิตและคุณภาพ กล่าวได้ว่าโพแทสเซียมช่วยเคลื่อนย้ายซูโครสซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างน้ำยางพาราเข้าสู่ท่ออาหาร (Osotsapa, 2015) โดยโพแทสเซียมมีบทบาทช่วยปลูกฤทธิ์ของเอนไซม์ ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งไอออนที่เนื้อเยื่อและเอนไซม์อื่น ๆ กว่า 50 ชนิด (Osotsapa, 2015) โพแทสเซียมช่วยปลูกฤทธิ์เอนไซม์ การเปลี่ยนแปลงโครงรูปของโปรตีนในเอนไซม์ และกระตุ้นการจับเกาะกับโมเลกุลเอนไซม์ (Marschner, 1995) การสังเคราะห์โปรตีน โดยเชื่อม Transfer Ribonucleic Acid เข้ากับไรโบโซม การสังเคราะห์แสง และการควบคุมศักย์ออสโมซิสซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปิดปิดของปากใบ โดยทั่วไปหากพืชได้รับโพแทสเซียมในปริมาณที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้ยางพารามีการเจริญเติบโตลดลง ในยางพาราที่ได้รับโพแทสเซียมไม่เพียงพอ พบว่า จะแสดงอาการใบเหลืองซีดทั่วทั้งใบ โดยจะเริ่มจากขอบใบและปลายใบ หากมีการขาดโพแทสเซียมรุนแรงจะมีลักษณะเหลืองซีดทั่วทั้งใบ (Kungpisdan, 2007) ลำต้นไม่สูง ใบน้อยและใบมีขนาดเล็ก ยางพาราก่อนเปิดกรีดต้องการโพแทสเซียมเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโต โดยอัตราการใช้ปุ๋ยและสูตรปุ๋ย จะแตกต่างกันตามชนิดของเนื้อดินและอายุของยางสำหรับยางพาราที่ปลูกในเขตปลูกยางเดิมซึ่งได้แก่ ภาคใต้และภาคตะวันออก แนะนำให้ใส่ปุ๋ยผสมสูตร 20-8-20 โดยอัตราการใช้ขึ้นกับอายุยาง และเนื้อดิน (Rubber Research Institute, 2018) ในขณะที่ยางพาราหลังเปิดกรีด ยางพารามีความต้องการปริมาณไนโตรเจนและโพแทสเซียมสูง โดยมีรายงานว่า การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใช้ปุ๋ยโพแทสเซียม ส่งผลให้การเจริญเติบโตของลำต้น และผลผลิตยางลดลง (Pushparajah and Sharifuddin, 1981) ฉะนั้นความต้องการปุ๋ยโพแทสเซียมในยางพาราจึงมีความจำเป็นต้องใช้ในปริมาณสูงเพื่อใช้ในการสร้างน้ำยางพารา และปุ๋ย

ผสมที่แนะนำสำหรับยางหลังเปิดกรีด คือ 29-5-18 อัตรา 1 กิโลกรัม/ต้น/ปี (Rubber Research Institute, 2018)

ดินที่ปลูกยางพาราในภาคใต้ ส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในอันดับดิน Entisols ดินในอันดับนี้มีการกระจายตัวประมาณร้อยละ 42 ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ (Kheoruenromne and Vijansorn, 2003) เป็นดินที่มีพัฒนาการสูง ชั้นล่างมีการสะสมอนุภาคแร่ดินเหนียว ร้อยละความอิ่มตัวด้วยเบสต่ำกว่าร้อยละ 35 และดินปลูกยางพาราในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นแร่ดินเหนียวที่ประกอบไปด้วยเคลโอลิไนต์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นแร่ที่มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ต่ำ ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารแคตไอออนต่ำไปด้วย (Brady and Weil, 2008) ดังนั้น จึงมีโอกาสสูญเสียธาตุอาหารแคตไอออน ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเป็นธาตุที่ยางพาราต้องการในการเจริญเติบโตได้ง่ายจากระบวนการชะละลาย จึงส่งผลให้ดินปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในระดับต่ำ เช่นเดียวกับที่มีรายงานว่าดินที่ปลูกยางในที่ลุ่มและที่ดอนในจังหวัดสงขลาส่วนใหญ่มีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินอยู่ระดับต่ำ (Poonpakdee, 2013) และในดินปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในจังหวัดหนองคายและขอนแก่นมีปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้ในระดับต่ำมากถึงค่าเฉลี่ย  $0.10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  และ  $0.50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  (Wiriyakitnateekul, 2016)

## 2.4 รูปของโพแทสเซียมในดิน

แหล่งที่มาของโพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่ได้มากจากหินและแร่ โดยส่วนใหญ่โพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบของหินและแร่ที่เกิดจากการผุพังและสลายตัวในกระบวนการเกิดดิน เมื่อหินและแร่เกิดผุพังสลายตัวด้วยกระบวนการต่าง ๆ จะปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืช ซึ่งรูปโพแทสเซียมในดินจะอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์และไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

### 2.4.1 ส่วนที่พืชที่ไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที (relative unavailable form)

โพแทสเซียมในรูปนี้เป็นองค์ประกอบของแร่ แร่ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในส่วนของกลุ่มแร่ปฐมภูมิได้แก่ 1) เฟลสปาร์ (feldspar)  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  กลุ่ม อัลคาไลเฟลด์สปาร์หรือโพแทสเซเฟลด์สปาร์ เช่น ออร์โทเคลสเฟลสปาร์ ไมโครไคลน์เฟลสปาร์ อะนอร์โทเคลสเฟลสปาร์ กลุ่มแพลจีโอเคลสเฟลสปาร์ (Na-Ca feldspar) เช่น แอลไบต์ (albite) โอลิโกเคลส (oligoclase) ที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือไม่ว่าจะเป็นปฏิกิริยาโปรทีโอไลซิส (proteolysis) ที่โปรตอน ( $\text{H}^+$ ) เข้าไปแทนที่ K ในโครงสร้างของแร่เฟลสปาร์ 2) แร่ไมกา (mica) ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบมีด้วยกัน 3 กลุ่มคือ กลุ่มแรก คือ มัสโคไวต์ (muscovite)  $\text{K}_2[\text{Si}_6\text{Al}_2]\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  กลุ่มที่สองคือ ไบโอไทต์ (biotite)  $\text{K}_2[\text{Si}_6\text{Al}_2]\text{Mg}_4\text{Fe}_2\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  และกลุ่มที่สาม คือ Phlogopite  $\text{K}_2[\text{Si}_6\text{Al}_2]\text{Mg}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

(Sposito, 2008) โปแทสเซียมในส่วนนี้มีถึงร้อยละ 90-98 ของโปแทสเซียมทั้งหมดในดินหรือประมาณ 5,000-25,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al.*, 2005) หากต้องการทราบปริมาณของโปแทสเซียมในส่วนที่เป็นองค์ประกอบของแร่ สามารถสกัดทางเคมีด้วยการต้มด้วยกรดผสมระหว่างกรดไนตริกกับกรดไฮโดรคลอริก และไฮโดรฟลูออริก (HF) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer) โดยอาศัยหลักการปลดปล่อยคลื่นแสงของอะตอม (Helmke and Sparks, 1996)

**2.4.2 ส่วนที่เป็นเป็นประโยชน์ต่อพืชอย่างช้า ๆ (slowly available form)** โปแทสเซียมในรูปนี้จะถูกตรึงอยู่ระหว่างผลึกของแร่ดินเหนียวหรือรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ คือถูกดูดยึดไว้อย่างแข็งแรงไม่สามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่น ๆ ได้ โดยคำว่าตรึง (fixation) หมายถึง การเปลี่ยนรูป K จากที่แลกเปลี่ยนได้หรือ K ในรูปของสารละลายดิน มาอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (Malavolta, 1985) ซึ่งโปแทสเซียมในรูปนี้เป็นแหล่งสำรองของโปแทสเซียมในดิน และกรณีที่โปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินมีปริมาณน้อย โปแทสเซียมในรูปนี้ก็จะปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ (Poonpakdee, 2013) ซึ่งโปแทสเซียมในรูปนี้สามารถประเมินได้โดยนำดินไปย่อยด้วยกรดไนตริก ( $1 \text{ M HNO}_3$ ) หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer โดยอาศัยหลักการปลดปล่อยคลื่นแสงของอะตอม (Helmke and Sparks, 1996) โปแทสเซียมที่ถูกตรึงในดินมีร้อยละ 1-10 ของโปแทสเซียมทั้งหมด (Havlin *et al.*, 2005) ปริมาณโปแทสเซียมในรูปนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแร่ดินเหนียวที่มีแร่โปแทสเซียมเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของแร่ทุติยภูมิ แร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เช่น มอนต์โมริลโลไนต์ สเมกไทต์ โดยเฉพาะแร่อิลไลต์ (illite) มีการศึกษาองค์ประกอบเชิงแร่วิทยาในดินนาที่ราบภาคกลางของประเทศไทยที่ไม่พบแร่อิลไลต์เป็นองค์ประกอบหรือพบในปริมาณที่เล็กน้อย ส่งผลให้โปแทสเซียมในรูปนี้ต่ำ (Rao *et al.*, 2010) ซึ่งมีค่าพิสัยอยู่ที่  $13.6 - 511 \text{ mg kg}^{-1}$  (Thasanon *et al.*, 2018) อย่างไรก็ตาม แร่ดินเหนียวชนิด 2:1 มีความสามารถตรึงโปแทสเซียมได้ดีกว่าแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 เนื่องจากมีพื้นที่ระหว่างผลึกสูงกว่าแร่ดินเหนียวชนิด 1:1

**2.4.3 ส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที (readily available form)** โปแทสเซียมในรูปนี้จะเป็นผลรวมโปแทสเซียมที่อยู่ในรูปสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ทั้งสองรูปนี้จัดได้ว่าเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ง่ายและใช้ได้ทันที ในส่วนนี้มีเพียงแค่ประมาณร้อยละ 0.1-2 ของโปแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Havlin *et al.*, 1999) ถ้าหากปริมาณโปแทสเซียมลดลงจากการดูดใช้ของรากพืช การชะละลายหรือสูญเสียไปกับผลผลิตพืช ในส่วนที่เป็นประโยชน์อย่างช้า ๆ จะค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมา และการประเมินโปแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ในสารละลายดินสกัดด้วยน้ำกลั่น

เขย่าเป็นระยะเวลา 30 นาที กรองส่วนสารละลายไปวัดปริมาณโพแทสเซียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ส่วนการประเมินโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ใช้ 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0 เขย่าเวลา 30 นาที (Thomas, 1982) การประเมินปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) ได้จากความเข้มข้นของโพแทสเซียม ที่สกัดด้วย 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  นำมาหักลบกับโพแทสเซียมในรูปสารละลายดิน (Thomas, 1982)

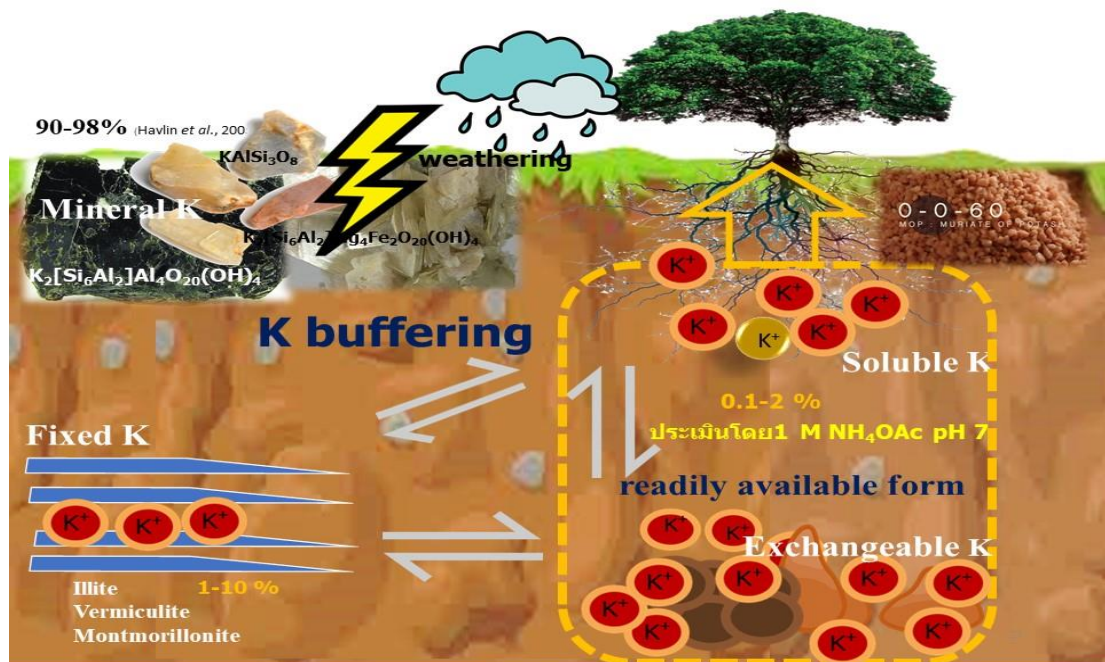


Figure 2.1 Potassium speciation in soil.

## 2.5 การต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดิน

การประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน ส่วนใหญ่จะประเมินโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ (available K) ซึ่งเป็นรูปที่โพแทสเซียมที่พืชดูดใช้ได้ทันที นั่นคือ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งเป็นโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวภายนอกของแร่ดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ และโพแทสเซียมที่อยู่ในสารละลายดิน โดยทั่วไปดินมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียม ดังนั้น เมื่อดินมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ลดลงหรือมีการรบกวนสมดุลรูปของโพแทสเซียมในดินโดยการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม ดินก็จะมึกลไกในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียม โดยกลไกดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 กลไก คือ

**2.5.1 การตรึงโพแทสเซียม** เป็นกลไกการรักษาสมดุลโพแทสเซียมในดิน กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมหรือวัสดุที่ให้ธาตุโพแทสเซียมแก่ดิน เมื่อดินมีระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มากขึ้น โพแทสเซียมส่วนหนึ่งจะถูกตรึงอยู่ระหว่างชั้นแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เพื่อรักษาระดับสมดุลโพแทสเซียม ทั้งนี้ปริมาณการตรึงขึ้นอยู่กับสมบัติดิน ในดินเนื้อละเอียดที่เป็นแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เป็นองค์ประกอบสามารถตรึงโพแทสเซียมได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบที่มีแร่ดินเหนียวกิจกรรมต่ำหรือแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 เป็นองค์ประกอบ เมื่อดินอยู่ในสภาวะเปียกและแห้ง หลับระหว่างชั้นมีการขยายเปิดออก ทำให้โพแทสเซียมถูกจับอยู่ในระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวได้ (Suwanarit, 1981)

**2.5.2 การปลดปล่อยโพแทสเซียม** เป็นการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากโพแทสเซียมในส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ๆ รูปร่างที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ทั้งนี้โดยโพแทสเซียมถูกตรึงซึ่งอยู่ในระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวถูกปลดปล่อยออกมาจากช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวออกมาสู่บริเวณใกล้ผิวรากพืชเพื่อรักษาสมดุลโพแทสเซียมในดิน (Grimme, 1985) การเกิดสมดุลระหว่างโพแทสเซียมในสารละลายดิน และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ การปลดปล่อยโพแทสเซียมจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีการขยายตัวของแร่ดินเหนียวและไอออนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวได้รับน้ำในกระบวนการ ion hydration ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาวะเปียกและแห้ง ดินต่างชนิดกันมีศักยภาพการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากส่วนที่ถูกตรึงให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของแร่ดินเหนียว โดยมีรายงานว่า ดินที่มีแร่สเมกไทต์เป็นองค์ประกอบจะมีความสามารถในการรักษาระดับความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมแก่พืชสูงกว่าดินที่มีแร่เคลโอไลนด์เป็นองค์ประกอบ (Suttanukool *et al.*, 2019) นอกจากนี้ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน และปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียมที่ใส่ลงในดินนับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดิน (Simosson *et al.*, 2007)

## 2.6. ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อรูปของโพแทสเซียมในดิน

**2.6.1 ชนิดของแร่ดินเหนียว** ความสามารถปลดปล่อยโพแทสเซียมขึ้นอยู่กับชนิดแร่ดินเหนียว โดยแร่ดินเหนียวที่ปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมา มาจากแร่ไมกาและเฟลด์สปาร์ซึ่งเป็นแร่ปฐมภูมิที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบ และจะพัฒนาไปเป็นแร่ทุติยภูมิต่อไป การปลดปล่อยโพแทสเซียมจากแร่ไมกาประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ การแลกเปลี่ยนโพแทสเซียมในแร่ดินเหนียว 2:1 ด้วยแคตไอออน และการละลายของไมกาจากการผุพังของแร่ ส่งผลให้โพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น (Sparks and Huang, 1985) แร่ดินเหนียวในดินที่สำคัญมี 2 ชนิด คือ แร่ดินเหนียวชนิด 1:1 และแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 ในส่วนของแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 เกิดจาก

Silicon tetrahedral sheet และ Aluminum octahedral sheet อย่างละหนึ่งแผ่นเชื่อมยึดด้วยพันธะของออกซิเจนที่ใช้ร่วมกัน และแต่ละชั้น (layer) ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ไม่มีการยืดหด และขยายตัว แร่ดินเหนียวชนิด 1:1 ที่พบมาก ได้แก่ เคโอลิไนต์ ส่วนแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 ซึ่งมี Silicon tetrahedral sheet 2 แผ่นประกบกับ Aluminum octahedral sheet 1 แผ่น แต่ละชั้นยึดกันด้วยพันธะ O-O linkage ส่งผลให้แร่ดินเหนียวชนิดนี้มีทั้งที่ยืดหดตัวได้ และยืดหดตัวไม่ได้ (Brady and Weil, 2008)

**2.6.2 การเปียกและแห้งของดิน** การทำให้ดินเปียกเปลี่ยนเป็นดินแห้งมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียม การปลูกพืชโดยไม่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอาจทำให้โพแทสเซียมที่อยู่ในหลีบของแร่ดินเหนียว 2:1 (non-exchangeable K) ปลดปล่อยออกมาเพื่อรักษาสสมดุลโพแทสเซียม เมื่อดินอยู่ในสภาวะแห้งและเปียกจะเป็นการเร่งการปลดปล่อยโพแทสเซียม กรณีใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไป ในดิน ทำให้มีปริมาณของโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์มากขึ้น ก็จะมีการรักษาสสมดุลโดยมีผลทำให้โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโพแทสเซียมที่ถูกตรึง กลไกที่สำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการตรึงโพแทสเซียมในดินได้แก่ การที่โพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนได้หรือรูปที่อยู่ในสารละลายดินเข้าไปอยู่ระหว่างช่องว่างผลึกของแร่ดินเหนียว 2:1 เมื่อดินแห้งทำให้ช่องว่างระหว่างผลึกหดตัวลงทำให้โพแทสเซียมถูกตรึง ดังนั้น การทำให้ดินแห้งหลังการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม จะส่งผลให้การตรึงโพแทสเซียมมากกว่าการปล่อยให้ดินเปียกตลอดเวลา แต่การทำให้ดินเปียกและแห้งสลับกัน จะเป็นการช่วยเร่งให้มีการปลดปล่อยหรือตรึงโพแทสเซียมได้มากกว่าการทำให้ดินแห้งเพียงครั้งเดียว มีรายงานการเติมปุ๋ยโพแทสเซียมในดินโดยไม่ทำให้ดินเกิดการแยกและแห้ง และทำให้ดินอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง พบว่า ดินสภาวะทำให้ดินเปียกสลับแห้งส่งผลให้เกิดการตรึงโพแทสเซียมมากกว่า (Shakeri and Abtahi, 2019)

**2.6.3 ความเป็นกรด-ด่างของดิน** ดินที่มีพีเอชต่ำจะตรึงโพแทสเซียมได้น้อย แต่จะปลดปล่อยโพแทสเซียมได้ง่ายกว่าดินที่มีพีเอชสูง ทั้งนี้ เพราะ  $H^+$  ถูกดูดยึดโดยคอลลอยด์ด้วยแรงเหนียวแน่นกว่าโพแทสเซียมและแคตไอออนอื่น ทำให้แคตไอออนอื่น ๆ รวมทั้ง  $K^+$  ในดินที่มีพีเอชต่ำมีโอกาสถูกไล่ที่ออกมาอยู่ในสารละลายดินมากกว่าดินที่มีพีเอชสูง ซึ่งมีผลทำให้โพแทสเซียมมีโอกาสถูกตรึงน้อยในดินกรด โดยเหตุดังกล่าวข้างต้นการใส่ปุ๋ยในดินที่เป็นกรดจึงช่วยให้โพแทสเซียมเข้ามาดูดยึดที่คอลลอยด์ได้มากขึ้น และมีโอกาสถูกตรึงได้มากขึ้น เพราะว่าดินที่มีพีเอชต่ำ ทำให้โพแทสเซียมถูกชะละลายได้ง่ายในดินกรด จึงทำให้โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ โดยเฉพาะดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 ทำให้มีการปลดปล่อยโพแทสเซียมน้อยลง มีรายงาน ไม่พบการตรึงของโพแทสเซียมในดินที่มีพีเอช 2.5 แต่การตรึงโพแทสเซียมในดินจะเพิ่มขึ้นเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างของดินเพิ่มจาก 2.5 สู่ 5.5 (Martin *et al.*, 1946 according to Sirichomchun, 2009.)



**2.6.4 สิ่งมีชีวิตในดิน** สิ่งมีชีวิตในดินเป็นตัวช่วยสนับสนุนการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากแร่ไมกาในดิน สิ่งมีชีวิตในดินยังทำให้โพแทสเซียมในสารละลายดินลดลงโดยการดูดกินโพแทสเซียมขึ้นไปใช้ (Chen *et al.*, 2020) เมื่อโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์มีน้อยลงเป็นผลทำให้เกิดการปลดปล่อยโพแทสเซียมในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมาเพื่อรักษาสมดุลโพแทสเซียมในดิน อีกทั้งสิ่งมีชีวิตยังสร้างกรดอินทรีย์จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ รวมไปถึงรากพืชที่มีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ กรดเหล่านี้ทำให้เกิดการผุพังสลายตัวของแร่ (Mueller, 2015) เป็นผลทำให้เกิดการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากแร่ สอดคล้องกับรายงานการใช้แบคทีเรีย *Bacillus aryabhattai SK1-7* สามารถหลั่งสารอินทรีย์ออกมาทำปฏิกิริยากับแร่ประกอบโพแทสเซียม (Chen *et al.*, 2022) เพื่อปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาเป็นประโยชน์แก่พืช

**2.6.5 ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียมในดิน** ในดินเขตร้อนภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นทำให้ดินส่วนใหญ่มีพัฒนาการสูง แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นแร่ทนทานต่อการสลายตัวมีความสามารถในการดูดซับแคตไอออนได้น้อย ดินสูญเสียแคตไอออนสภาพเบส ส่งผลให้พบแคตไอออนส่วนใหญ่เป็นแคตไอออนสภาพกรด ส่งผลให้ดินส่วนใหญ่เป็นดินกรด เมื่อในสภาวะที่ดินมีพีเอชต่ำกว่า 5.5 การละลายของเหล็กและอะลูมิเนียมมากขึ้นด้วย ขณะที่ความเป็นประโยชน์ของแคลเซียม แมกนีเซียม ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมลดลง (Brady and Weil, 2008)

**2.6.6 อินทรีย์วัตถุในดิน** ถึงแม้ว่าแหล่งโพแทสเซียมหลักมาจากการผุพังสลายตัวของแร่ แต่โดยทั่วไปแล้ว นอกจากแร่ดินเหนียวที่ควบคุมปัจจัยความเข้มข้นของโพแทสเซียม มีอินทรีย์วัตถุที่ควบคุมปัจจัยนี้เช่นกันโพแทสเซียมเป็นธาตุที่พืชดูดใช้มากถึง 10-50 กก.ต่อเฮกตาร์ต่อปี (Vityakon, 2004) ดังนั้น วัสดุอินทรีย์ที่มีแหล่งของโพแทสเซียมมาก เมื่อย่อยสลายก็ปลดปล่อยโพแทสเซียมได้ยิ่งไปกว่านั้น ปุ๋ยคอก หรือเถาต่าง ๆ เป็นแหล่งโพแทสเซียมที่สำคัญ นอกจากนั้น อินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งประจุไฟฟ้าที่สำคัญโดยเฉพาะประจุไฟฟ้าลบ เมื่อเทียบกับคอลลอยด์ชนิดอื่น ๆ ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคตไอออนได้ดี ทำให้ดูดซับธาตุโพแทสเซียมได้ดีกว่าดินที่ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นยังมีรายงานถึงปริมาณอินทรีย์วัตถุมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการดูดโพแทสเซียมในดินได้ดีขึ้น (Wang and Huang, 2001)

## 2.7 การประเมินรูปของโพแทสเซียมในดิน

การประเมินความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินเป็นการประเมินปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพื่อนำไปสู่การแนะนำการใช้ปุ๋ย วิธีการที่ใช้อย่างแพร่หลายคือ การสกัดดินด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต (1M NH<sub>4</sub>OAc pH 7.0) (Jones, 2001; Thomas, 1982; Helmke and Sparks, 1996) โพแทสเซียมที่สกัดในส่วนนี้เรียกว่า โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชซึ่งเป็นผลรวมของ

โพแทสเซียมในสารละลายดินและโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ส่วนปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดินไม่สามารถบ่งชี้สถานะของระดับความเพียงพอต่อความต้องการของพืชได้ เนื่องจากโพแทสเซียมมีอยู่ในดินจริงแต่ขณะนั้นพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในปัจจุบันการประเมินรูปของโพแทสเซียมในดิน ออกเป็น 2 แบบ คือ การประเมินรูปของ K ในดินแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (traditional single leaching; TSL) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการใช้ประเมินระดับโพแทสเซียมในดินเพื่อแนะนำการใช้ปุ๋ย และการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP) ซึ่งแบ่งรูปของ K ตามปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อรูปของ K

**2.7.1 การประเมินรูปของ K ในดินแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช** การประเมินแบบนี้จะอาศัยการแบ่งรูปของ K ในดินตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช ทั้งแบ่งสามารถแบ่งรูปของโพแทสเซียมได้ดังนี้

**1) โพแทสเซียมสารละลายดิน** การวิเคราะห์โพแทสเซียมในรูปสารละลายดิน สารละลายในรูปนี้สกัดได้ง่าย เนื่องจากเป็นโพแทสเซียมอยู่ในสารละลายดิน รวมถึงแร่ที่ละลายได้ง่าย เป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ดินที่เพิ่งมีการมีใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม ทำให้พบโพแทสเซียมในรูปนี้สูง ซึ่งจะสกัดด้วยน้ำกลั่นหรือน้ำปราศจากไอออน โดยทั่วไปมักใช้สัดส่วนระหว่างดินต่อน้ำเท่ากับ 1:10 w/v (Thomas, 1982) หลังจากนั้นนำมาเขย่า และกรองสารละลายใส และวัดปริมาณด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

**2) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้** โพแทสเซียมในรูปนี้เป็นส่วนที่ถูกดูดซับอยู่บริเวณคอลลอยด์ดิน การประเมินโพแทสเซียมในรูปนี้ทำได้โดยการสกัดโดยการ 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0 เป็นวิธีที่ได้ความนิยม ง่าย สะดวกและจะสกัดได้ดีในดินทุกชนิด อีกทั้งการสกัดด้วยวิธีนี้ยังสกัดโพแทสเซียมได้ทั้งโพแทสเซียมที่สกัดได้และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำรวมกัน ซึ่งผลรวมของโพแทสเซียมทั้ง 2 รูป เรียกว่า โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (available K) ในประเทศไทยส่วนใหญ่อาจเรียกว่า โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพื่อความเข้าใจอย่างง่าย แต่ความเป็นจริงคือเป็นโพแทสเซียมที่สกัดได้ ซึ่งเป็นผลรวมของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้และโพแทสเซียมในสารละลายดิน การใช้น้ำยาสกัดแอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) โดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นน้ำยาสกัดแคตไอออนสภาพเบสในดิน น้ำยาสกัดแอมโมเนียมอะซิเตตนอกจากจะสามารถใช้สกัดโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชแล้ว (Onthong and Poonpakdee, 2020) ยังสามารถสกัดแคตไอออนชนิดอื่นในดิน เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และโซเดียมออกมาได้อีกด้วย โดยทั่วไปสัดส่วนของดินต่อน้ำยาสกัดเป็น 1:10 (w/v) และใช้เวลาสกัด 30 นาที ซึ่ง  $\text{NH}_4^+$  จะเข้าไปแทนที่  $\text{K}^+$  ที่ถูกดูดซับไว้ให้ออกมาอยู่ในสารละลายดิน (Department of Land Development, 2005) ค่าที่ได้จากการสกัดด้วย 1 M

$\text{NH}_4\text{OAc}$  นำมาหักลบกับปริมาณของโพแทสเซียมในสารละลายดิน จะได้ค่าโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้

นอกจากการสกัดโพแทสเซียมด้วยน้ำยาสกัด 1M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  แล้ว ยังมีสารสกัดโพแทสเซียมด้วยวิธีอื่น ๆ (Table 2.1) เช่น วิธี Mehlich no.1 (0.05 M HCl+0.025 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) วิธีการนี้นอกจากจะสกัดโพแทสเซียม K ได้แล้ว ยังสกัดฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ได้อีกด้วย และสกัดได้ดีในดินทรายที่มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ การสกัดด้วยวิธี Mehlich no.2 (0.2 M HOAc+0.015 M  $\text{NH}_4\text{F}$ +0.2 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$  + 0.012 M HCl) การสกัดด้วยวิธีนี้นอกจากจะสกัด โพแทสเซียม ฟอสฟอรัสแล้ว ยังสามารถสกัดจุลธาตุบางตัวได้ นอกจากนั้น วิธีสกัดด้วย Ammonium bicarbonate DTPA จะสกัดได้ดีในสภาพดินที่เป็นด่าง วิธีนี้ยังสกัดฟอสฟอรัส P ไนเตรท  $\text{NO}_3^-$  และจุลธาตุบางตัว และสุดท้ายวิธี Bray P-1 (0.025 M HCl+0.03 N  $\text{HN}_4\text{F}$ ) วิธีนี้ยังสกัดฟอสฟอรัสได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามแม้ว่าน้ำยาสกัดเหล่านี้จะสามารถใช้ประเมินโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินได้ แต่สำหรับประเทศไทยพบว่ายังไม่เป็นที่นิยมสำหรับใช้ประเมินโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน

**3) โพแทสเซียมที่ถูกตรึง** โดยโพแทสเซียมในรูปนี้ คือ โพแทสเซียมที่ถูกตรึงอยู่ในระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียวเป็นรูปโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอย่างช้า ๆ ซึ่งจะปลดปล่อยอย่างช้า ๆ ออกมาสู่ดินเมื่อดินมีระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ โพแทสเซียมทั้ง 3 รูปนี้ที่กล่าวมาข้างต้น จะมีการแปรผันกันได้ เพื่อให้ K ในดิน อยู่ในสภาวะสมดุล (Huang, 2005) โดยทั่วไปโพแทสเซียมที่ถูกตรึงสามารถประเมินได้โดยการสกัดโดยการต้มด้วย 1 M  $\text{HNO}_3$  ซึ่งเป็นกรดแก่และต้มที่อุณหภูมิสูงประมาณ 113 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ในโครงสร้างของแร่ดินเหนียวถูกทำลาย และมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมที่อยู่ในระหว่างหีบของแร่ดินเหนียวออกมา หลังจากนั้น นำสารละลายที่ได้มาวัดความเข้มข้นของโพแทสเซียม ทั้งนี้ความเข้มข้นดังกล่าวจะเป็นผลรวมความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายดิน โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และโพแทสเซียมที่ถูกตรึง อย่างไรก็ตามหากต้องการทราบเฉพาะความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่ถูกตรึงสามารถทำได้โดยนำความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่ต้มด้วย 1 M  $\text{HNO}_3$  มาหักลบที่สกัดได้ด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ก็จะทำให้ทราบโพแทสเซียมในรูปที่ถูกตรึงได้อย่างแท้จริง (Pratt, 1965)

**Table 2.1** Methods and reagents for soil potassium extraction (Jone, 2001).

Method	Reagent	Soil:reagent solution (w/v)	Extraction time (min.)
Morgan	0.7 N NaC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> +0.54N CH <sub>3</sub> COOH pH 4.8	1:5	30
1 M NH <sub>4</sub> OAc pH 7.0	Acetic acid (99.5% w/w CH <sub>3</sub> COOH) + ammonium hydroxide (25% w/w NH <sub>4</sub> OH)	1:10	30
Mehlich 1.	0.5 M HCl + 0.025 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1:05	15
Mehlich 2.	0.2 M CH <sub>3</sub> COOH + 0.015 M NH <sub>4</sub> F + 0.2 M NH <sub>4</sub> Cl + 0.012 M HCl	1:5-1:10	-
Mehlich 3.	0.2 N CH <sub>3</sub> COOH+0.015N NH <sub>4</sub> F+0.25N NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> + 0.013N HNO <sub>3</sub> +0.001 M EDTA	1:10	5
Ammonium bicarbonate-DTPA	1 M NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub> + 0.005 M DTPA pH 7.6	1:02	15
Calcium chloride	0.01M CaCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	1:10	120
Bray P-1	0.025 M HCl + 0.03 N NH <sub>4</sub> F	1:10	1

**4) โพลแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่** โพลแทสเซียมในรูปนี้หมายถึง โพลแทสเซียมที่โพลแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ เป็นรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที โพลแทสเซียมในรูปนี้มีปริมาณสูง การประเมินปริมาณโพลแทสเซียมรูปนี้สามารถทำได้โดยใช้วิธีการย่อยด้วย Hydrogen fluoride (HF) เพื่อให้ HF ทำลายโครงสร้างของแร่ หลังจากนั้น นำสารละลายที่ได้มาวัดความเข้มข้นของโพลแทสเซียมโดยเครื่อง AAS โดยความเข้มข้นดังกล่าวเป็นความเข้มข้นของโพลแทสเซียมทั้งหมดในดิน ซึ่งเป็นผลรวมของโพลแทสเซียมในสารละลายดิน โพลแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โพลแทสเซียมที่ถูกตรึง และโพลแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ อย่างไรก็ตามสามารถประเมินโพลแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ได้โดยผลต่างโพลแทสเซียมที่ถูกย่อยด้วยกรด HF หักลบกับปริมาณโพลแทสเซียมที่ย่อยด้วย 1 M HNO<sub>3</sub> (Pratt, 1965) นอกจากนี้ยังมีวิธีการสกัดทางเคมีไฟฟ้า และอีกทั้งวิธีการสกัดทางเคมี-กายภาพโดยเรซิน เรซินจะเกิดการแลกเปลี่ยนแคต

ไอออนกับธาตุต่าง ๆ โดยใช้หลักการให้แหล่งประจุลบที่จะดูดซับ  $K^+$  โดยการแลกเปลี่ยนกับ  $H^+$  บนเรซินแลกเปลี่ยนแคตไอออน (McLean and Watson, 1985)

### 2.7.2 การสกัดโพแทสเซียมโดยวิธีลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP)

การพัฒนาการสกัดแบบลำดับขั้น เป็นการวิเคราะห์รูปของโพแทสเซียมที่พัฒนามาจากการวิเคราะห์โลหะหนักในดิน เช่น สารหนู (As), แคดเมียม (Cd), โคบอลต์ (Co), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu), นิกเกิล (Ni), ซีลีเนียม (Se) และ สังกะสี (Zn) (Tessier *et al.*, 1979) ทั้งนี้วิธีการนี้ได้มีการประยุกต์ใช้กับธาตุอาหารพืช เช่น โพแทสเซียม (Poonpakdee *et al.*, 2018) แมกนีเซียม (Ntlopo *et al.*, 2022) แคลเซียม (He *et al.*, 2015) เหล็ก (Chen *et al.*, 2019) และฟอสฟอรัส (Bai *et al.*, 2023) การสกัดแบบลำดับขั้น มีสมมติฐานว่าสภาพแวดล้อมเป็นตัวกำหนดรูปความเป็นประโยชน์ของธาตุต่าง ๆ ในดิน โดยปัจจัยสิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการละลาย การตกตะกอน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุนั้น ๆ (Tessier *et al.*, 1979) การสกัดแบบลำดับขั้นเป็นการสกัดธาตุที่สนใจในดินโดยเป็นการสกัดต่อเนื่องจากรูปหนึ่งไปอีกรูปหนึ่งในตัวอย่างดินเดียวกัน ทั้งนี้ น้ำยาสกัดเริ่มแรกจะมีฤทธิ์และพีเอชเป็นกลางไปจนถึงกรดเข้มข้น ทั้งนี้การสกัดแบบลำดับขั้นมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์โพแทสเซียมที่ง่ายต่อการสกัดนั้นก็คือรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งถูกยึดโดยประจุทางไฟฟ้าในดินไปจนถึงโพแทสเซียมที่เป็นโครงสร้างองค์ประกอบของแร่ ทั้งนี้โพแทสเซียมในดินโดยการสกัดแบบลำดับขั้นถูกแบ่งออกเป็น 5 รูป คือ

1) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable) เป็นรูปที่เป็นประโยชน์กับพืช โพแทสเซียมในรูปนี้ส่วนใหญ่ดูดซับบนอนุภาคแร่ดินเหนียวและบริเวณที่ถูกดูดซับไว้บริเวณผิวของอินทรีย์วัตถุในดิน โพแทสเซียมในรูปนี้สามารถประเมินได้โดย 1 M  $MgCl_2$  pH 7 โดยใช้สัดส่วนดินต่อน้ำยาสกัดเป็น 1:8 (w/v) และสกัดเป็นเวลา 60 นาที โดยอาศัยหลักการ  $Mg^{2+}$  แทนที่  $K^+$  ที่บริเวณคอลลอยด์ดิน ทั้งนี้อาจสกัดด้วย 1 M  $CH_3COONa$  pH 8.2 (Tessier *et al.*, 1979) นอกจากนั้นก็มีวิธีการสกัดด้วย  $Mg(NO_3)_2$  pH 7 โดยใช้สัดส่วนดินต่อน้ำยาสกัดเป็น 1:10 (w/v) (Krishnamurti *et al.*, 1995) ให้ออกมาอยู่ในรูปสารละลาย เก็บสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ด้วยเครื่อง AAS จากนั้น นำตัวอย่างดินไปสกัดโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบกับคาร์บอเนตในลำดับถัดไป

2) โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบกับคาร์บอเนต (bound to carbonate) ปริมาณของโพแทสเซียมในรูปนี้จะมีความสัมพันธ์กับความเป็นกรดต่างของดิน หากดินมีพีเอชต่ำโพแทสเซียมในรูปนี้จะมีอยู่น้อย ในขณะที่เดียวกันหากดินมีพีเอชสูงโพแทสเซียมในรูปนี้ก็ถูกจับกับสารประกอบคาร์บอเนตในดิน ส่งผลให้ละลายน้ำยากขึ้น ทั้งนี้สามารถประเมินโพแทสเซียมที่เป็น

องค์ประกอบกับคาร์บอนेटได้โดย นำดินที่ได้จากการสกัดโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ข้างต้น มาเติม 1 M NaOAc pH 5 โดยใช้สัดส่วนดินต่อน้ำยาสกัดเป็น 1:8 (w/v) และเขย่าเป็นเวลา 60 นาที จากนั้น นำตัวอย่างดินที่ได้ไปสกัดโพแทสเซียมที่ถูกจับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ในลำดับถัดไป (Tessier *et al.*, 1979) ส่วนสารละลายที่สกัดได้นำไปวัดปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบกับคาร์บอนेट โดยเครื่อง AAS

**3) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (bound to Fe-Mn Oxides)** เป็นโพแทสเซียมรูปที่ถูกจับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ โดยอะตอมของเหล็กของแมงกานีส ทำปฏิกิริยากับ oxygen เกิดเป็น oxyhydroxyl groups และสารเคลือบบริเวณอนุภาคดิน ทั้งนี้สามารถประเมินปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกจับอยู่กับ Fe-Mn oxide ได้จากนำตะกอนดินที่เหลือจากการสกัดใน ข้อ 2) มาสกัดด้วย 0.04 M  $\text{HN}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  ในสารละลาย 25% HOAc หรือ สกัดด้วย 0.3 M  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  + 0.175 M NaOAc + 0.025 M H-citrate หลังจากนั้นต้มให้ความร้อน แยกสารละลายที่สกัดได้กับอนุภาคดิน (Tessier *et al.*, 1979) จากนั้น นำตัวอย่างที่ได้ไปสกัดโพแทสเซียมที่ถูกจับกับอินทรีย์วัตถุในลำดับถัดไป ส่วนสารละลายที่สกัดได้นำไปวัดปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกจับกับ Fe-Mn oxide ด้วยเครื่อง AAS

**4) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับอินทรีย์วัตถุ (K bound to organic matter)** โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์หรือเป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุในดิน เช่น เศษซากพืช ซากสัตว์หรือสิ่งมีชีวิต ในสภาวะร้อนขึ้นส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุในดินได้ดี ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายของเศษซากพืชได้ดีส่งผลให้มีอินทรีย์วัตถุต่ำสามารถประเมินได้โดยนำตะกอนดินที่เหลือจากการสกัดโพแทสเซียมที่ถูกจับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ข้างต้น มาเติม  $\text{HNO}_3$  ความเข้มข้น 0.02 M และ 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  pH 2 (Tessier *et al.*, 1979) นำตัวอย่างที่ได้ไปสกัดโพแทสเซียมในรูปตะกอนตกค้างในลำดับถัดไป ส่วนสารละลายที่สกัดได้นำไปวัดปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุด้วยเครื่อง AAS

**5) โพแทสเซียมในรูปตะกอนตกค้าง (residual)** นำตะกอนดินที่เหลือจากการวิเคราะห์โพแทสเซียมที่ถูกจับกับอินทรีย์วัตถุถ่ายใส่เทปลอนบีกเกอร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C จนดินแห้ง ย่อยด้วย  $\text{HClO}_4$  เข้มข้น และ HF (Tessier *et al.*, 1979) หลังจากนั้น นำสารสกัดที่ได้ไปวัดด้วยเครื่อง AAS

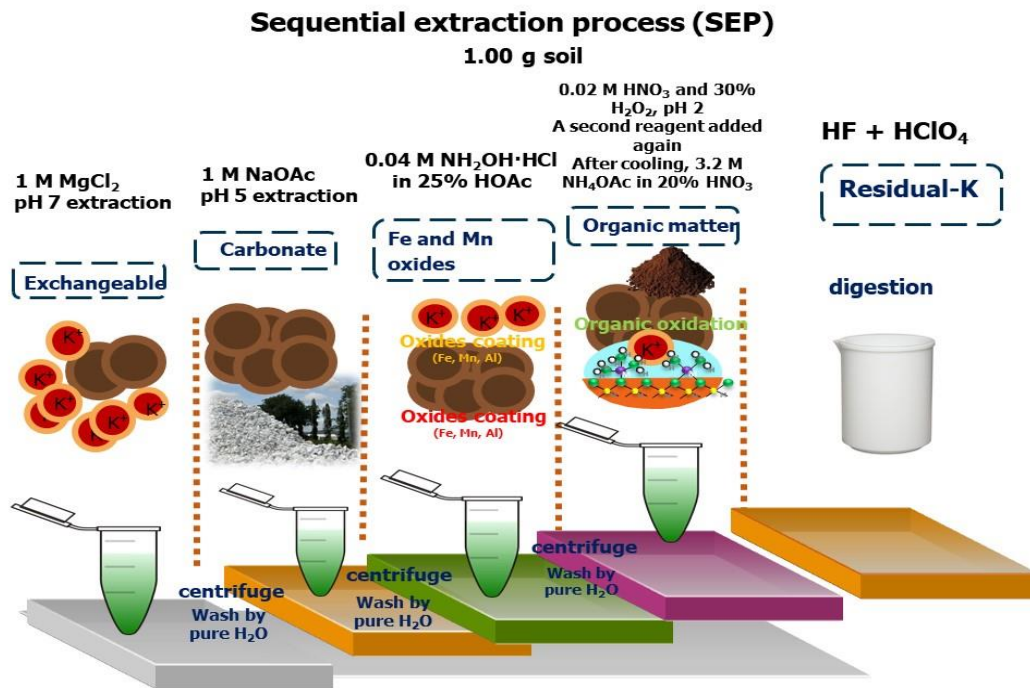


Figure 2.2 Sequence of extraction of soil K speciation.

ที่มา : ดัดแปลงจาก Tessier *et al.* (1979)

## 2.8 การได้รับและสูญเสียโพแทสเซียมจากดิน

การปลูกยางให้เจริญเติบโตดี และให้ผลผลิตดี นอกจากขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพื้นที่แล้ว พันธุ์ยาง การจัดการสวน และการจัดการธาตุอาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่ง โดยธาตุอาหารถูกนำไปสร้างมวลของต้นในแต่ละระยะการเจริญเติบโต ทั้งนี้การได้รับและสูญเสียโพแทสเซียมจากดินเกิดได้จาก

**2.8.1 การใส่ปุ๋ย** พืชต้องการโพแทสเซียมเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต การใส่ปุ๋ยจึงเป็นการชดเชยธาตุอาหารไปจากดินที่สูญเสียไปกับผลผลิต และการติดไปกับส่วนต่าง ๆ ของลำต้น โดยปุ๋ยเคมีที่เป็นแหล่งโพแทสเซียม ได้แก่ โพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) โพแทสเซียมซัลเฟต (0-0-50) โพแทสเซียมไนเตรต (13-0-46) เป็นต้น

**2.8.2 ติดไปกับผลผลิต** เมื่อยางพาราดูดโพแทสเซียมเข้าไปใช้จะมีการสะสมโพแทสเซียมในส่วนต่าง ๆ ของต้นยางพารา เมื่อส่วนต่าง ๆ ของต้นยางพารามีการร่วงหล่นและย่อยสลายจึงเป็นแหล่งให้โพแทสเซียมรวมถึงธาตุอื่น ๆ ให้แก่ดิน ดังนั้น การนำผลผลิต หรือชีวมวลต่าง ๆ ออกไปจาก

แปลงก็เปรียบเสมือนการนำธาตุอาหารออกไปจากดิน โดยมีรายงานว่าดินสูญเสียโพแทสเซียม 25 กิโลกรัมต่อผลผลิตน้ำยาง 1 ตัน (Rubber Research Institute, 2018)

**2.8.3 การชะละลาย** โพแทสเซียมเป็นธาตุที่สูญเสียโดยการชะละลายไปกับน้ำดินที่ซึมลงสู่ดินชั้นล่างได้ง่าย โดยเฉพาะในดินเนื้อหยาบที่มีการดูดซับโพแทสเซียมได้ต่ำ โพแทสเซียมจึงถูกชะละลายให้สูญเสียและรวดเร็วกว่าดินเนื้อละเอียด การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินเนื้อหยาบควรใส่ในปริมาณน้อย แต่บ่อยครั้ง และควรใส่ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมด้วยเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับแคตไอออนรวมถึงโพแทสเซียมในดินได้มากขึ้น



### บทที่ 3

## การกระจายตัวของรูปโพแทสเซียมในเนื้อดินที่แตกต่างกัน ในดินปลูกยางพาราภาคใต้ของไทย

### บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของหลายประเทศ ในภูมิภาคเอเชีย ได้แก่ ประเทศไทย อินโดนีเซีย เวียดนาม จีน และมาเลเซีย (Office of Agricultural Economics, 2021) ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์ยางเป็นอันดับหนึ่งของภูมิภาค ซึ่งสร้างมูลค่าเฉลี่ยให้กับประเทศไทยกว่า 116,397 ล้านบาท (Office of Agricultural Economics, 2020) ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารา 24.46 ล้านไร่ กระจายตามภาคต่าง ๆ โดยเฉพาะในภาคใต้ที่มีพื้นที่ปลูกยางพาราลงถึง 14.19 ล้านไร่ (Office of Agricultural Economics, 2021) ดินในประเทศไทยส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในอันดับดิน Entisols ดินในอันดับนี้มีการกระจายตัวประมาณร้อยละ 42 ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ (Kheoruenromne and Vijansorn, 2003) ดินในอันดับนี้เป็นดินที่มีพัฒนาการสูง ดินมีพีเอชต่ำ มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ต่ำ มีแคตไอออนสภาพเบสต่ำโดยเฉพาะโพแทสเซียมซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของต้นยางพารา (Correia *et al.*, 2017) นอกจากนี้ ดินในอันดับดิน Entisols ยังมีออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ร้อยละส่วนใหญ่ของแร่ดินเหนียวเป็นแร่ที่มีกิจกรรมต่ำ เช่น เคโอลิไนต์ จากที่ตั้งของประเทศไทยที่อยู่ในเขตร้อนชื้น ฝนตกชุก ส่งผลให้กระบวนการต่าง ๆ ทางดินเกิดขึ้นได้ดี โดยเฉพาะกระบวนการชะละลายที่เป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการสูญเสียโพแทสเซียมออกไปจากดิน

ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีทั้งดินเนื้อหยาบและเนื้อละเอียด (Poonpakdee *et al.*, 2013) โดยทั่วไปเนื้อดินละเอียดมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมทั้งหมด ตลอดจนความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดินมากกว่าดินเนื้อหยาบ (Brady and Weil, 2008) ในปัจจุบันการประเมินรูปของโพแทสเซียมในดินถูกออกเป็น 2 แบบ คือ การประเมินรูปของ K ในดินแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (single leaching extraction; SLE) วิธีนี้เป็นการสกัดแบบขั้นตอนเดียวเพื่อสกัดรูปของโพแทสเซียมตามรูปที่ถูกแบ่งความเป็นประโยชน์ของพืช และเป็นวิธีที่นิยมในการใช้ประเมินระดับโพแทสเซียมในดินเพื่อแนะนำการใช้ปุ๋ย (Poonpakdee *et al.*, 2018 ; Suttanukool *et al.*, 2019) การสกัดรูปของโพแทสเซียมในดินโดยวิธีนี้แบ่งโพแทสเซียมในดินออกเป็น 4 รูป คือ 1) โพแทสเซียมในสารละลายดิน (water soluble K) 2) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K) 3) โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (non-exchangeable K) และ 4)

โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (mineral K) (Cox *et al.*, 1999; Brady and Weil, 2008) สำหรับรูปโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช คือ โพแทสเซียมในสารละลายดิน และรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้แอมโมเนียมอะซิเตต (1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$ , pH 7.0) (Sparks and Huang, 1985; Thomas, 1982) เป็นสารสกัด การประเมินรูปโพแทสเซียมในดินที่ถูกแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก อย่างไรก็ตาม การประเมินรูปของโพแทสเซียมในดินด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถระบุปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางดินที่อาจส่งผลต่อความสามารถในการละลาย การตกตะกอน และของธาตุอื่นเนื่องมาจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์รูปของธาตุต่าง ๆ ได้

การประเมินรูปของ K ในดินแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (SLE) มีข้อจำกัดข้างต้น ทั้งนี้ การสกัดแบบตามลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP) สามารถช่วยลดข้อจำกัดจากวิธีการ SLE ซึ่งการสกัดแบบลำดับขั้นเป็นการวิเคราะห์ธาตุโลหะในดินและตะกอนที่มีสมมุติฐานว่าปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมของดินเป็นตัวกำหนดความเป็นประโยชน์ การละลาย และการตกตะกอนของธาตุนั้น ๆ ในดิน วิธีการสกัดโลหะในดินวิธีการนี้ถูกพัฒนาและนิยมแพร่หลายในการประเมินความเป็นประโยชน์ของธาตุโลหะหนักในดิน (Tessier *et al.*, 1979) อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้การสกัดแบบลำดับขั้นในการประเมินธาตุอื่น ๆ ที่เป็นธาตุอาหารพืช ได้แก่ สังกะสี (Ge *et al.*, 2022) โพแทสเซียม (Poonpakdee *et al.*, 2018) แมกนีเซียม (Ntlopo *et al.*, 2022) แคลเซียม (He *et al.*, 2015) เหล็ก (Chen *et al.*, 2019) และ ฟอสฟอรัส (Bai *et al.*, 2023) เพื่อประเมินรูปของธาตุในดิน การสกัดแบบตามลำดับขั้นแบ่งโพแทสเซียมในดินแบ่งออก 5 รูป คือ 1) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable-K) 2) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับคาร์บอเนต (carbonate-K) 3) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (Fe and Mn oxide-K) 4) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับอินทรีย์วัตถุ (organic matter-K) และ 5) โพแทสเซียมในรูปตะกอนตกค้าง (residual-K)

การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของโพแทสเซียมในรูปต่าง ๆ ที่ประเมินได้จากวิธีการที่แตกต่างกันด้วยวิธีแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชและวิธีสกัดแบบลำดับขั้นนั้นอาจมีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาสัดส่วนรูปต่าง ๆ ของโพแทสเซียม และหาความสัมพันธ์ของโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินจากการสกัดโพแทสเซียมในดินด้วยวิธีแบ่งตามความเป็นประโยชน์ของพืช (SLE) โพแทสเซียมที่สกัดแบบลำดับขั้น (SEP)

**Table 3.1** Universal Transverse Mercator (UTM) coordinates of the sampling areas.

Soils textural group	Soils series	Soil taxonomy <sup>1</sup>	Coordinates UTM system
Fine	Ao Luek (Ak)	Very-fine, kaolinitic, isohyperthermic Rhodic Kandiodulxs	47P X573536 Y1013713
	Na Thon (Ntn)	Fine, mixed, semiactive, isohyperthermic Typic Hapludults	47N X642331 Y784884
	Ruso (Ro)	Fine-silty, mixed, semiactive, isohyperthermic Typic Paleudults	47N X654353 Y759784
	Phattalung (Ptl)	Fine, kaolinitic, isohyperthermic Plinthic Paleaquults	47N X641509 Y783460
	Fang Daeng (Fd)	Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Rhodic Kandiudults	47N X634957 Y808358
Medium	Sai Buri (Bu)	Fine-silty, kaolinitic, isohyperthermic Aquic Kandiudults	47N X681592 Y746489
	Lamphu La (LL)	Fine, mixed, semiactive, isohyperthermic Typic Palehumults	47N X621086 Y815550
	Hat Yai (Hy)	Clayey-skeletal, kaolinitic, isohyperthermic Typic Paleudults	47N X649387 Y783099
Course	Kho Hong (Kh)	Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiudults	47N X672121 Y765150
	Bacho (Bc)	Coated, isohyperthermic, Typic Quartzipsamments	47N X685401 Y783772
	Khlong Thom (Km)	Fine-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiudults	47N X653006 Y784688
	Na Thawi (Nat)	Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiudults	47N X690435 Y745021

Remark: Soil taxonomy<sup>1</sup> based on Land Development Department (1977)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การเก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างดิน

ดินที่ใช้ศึกษาเป็นดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งมีเนื้อดินแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ เนื้อดินกลุ่มดินละเอียด ได้แก่ ชุดดินอ่าวลึก (Ak), นาทอน (Ntn), รือเสาะ (Ro) และพัทลุง (Ptl) ดินกลุ่มเนื้อปานกลาง ได้แก่ ชุดดินฝั่งดิน (Fd), สายบุรี (Bu), ลำภูรา, (LL) และหาดใหญ่ (Hy) และดินกลุ่มเนื้อหยาบ ได้แก่ ชุดดินคองหงษ์ (Kh), บาเจาะ (Bc), คลองท่อม (Km), และนาทวี (Nat)

ทั้งนี้จุดเก็บดินที่ใช้ศึกษาประกอบไปด้วยในจังหวัดสงขลา พัทลุง และสุราษฎร์ธานี (Table 3.1) เก็บดินปลูกยางพาราที่ความลึก 0-30 เซนติเมตร (Kungpisdan, 2008) นำมาคลุกให้เข้ากัน แบ่งดินประมาณ 1 kg นำมาผึ่งให้แห้ง บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm สำหรับนำไปวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดิน และตะแกรงขนาด 0.5 mm สำหรับวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุ (Onthong & Poonpakdee, 2020)

#### การวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดิน

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินโดยใช้วิธีมาตรฐาน (Jones, 2011) ได้แก่ พีเอช และค่าการนำไฟฟ้า (ดิน:น้ำ = 1:5 w/v) อินทรีย์วัตถุ (Walkley and Black method) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray II method) ส่วน ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน แคลเซียม แมกนีเซียมที่สกัดได้ ทำได้โดยนำดินมาสกัดด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0 แคลเซียมและแมกนีเซียมวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) โดยใช้หลักการของ atomic absorption spectroscopy และเนื้อดินโดยวิธี Hydrometer (Gee and Bauder, 1986)

#### การสกัดโพแทสเซียมแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (single leaching extraction; SLE)

วิเคราะห์โพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดิน (Helmke and Sparks, 1996) ได้แก่ 1) โพแทสเซียมในสารละลายดิน (Sol-K) โดยชั่งดิน 5 กรัม เขย่าด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร นาน 30 นาที 2) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exch-K) โดยชั่งดิน 5 กรัม สกัดด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  นำสารละลายที่ผ่านการกรองวัดโพแทสเซียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) โดยหักลบกับ Sol-K (Thomas, 1982) 3) โพแทสเซียมที่สกัดได้ ( $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ ) เป็นผลรวมของ Sol-K และ Exch-K 4) โพแทสเซียมที่ถูกรตรึง (Fixed-K) 5) โพแทสเซียมที่สกัดด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3\text{-K}$ ) ชั่งดิน 2.5 กรัม สกัดด้วย 1 M  $\text{HNO}_3$  25 มิลลิลิตรอุณหภูมิ 113 °C นาน 25 นาที เมื่อตัวอย่างเย็นลง นำตัวอย่างมากรองปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน เป็น 100 มิลลิลิตร คำนวณ Fixed-K จากผลต่างโพแทสเซียมที่สกัดได้โดย  $\text{HNO}_3\text{-K}$  กับ  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  (Pal *et al.*, 2001) 6) โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (Min-K) และ 7) โพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Total-K) ชั่งดิน 0.5 กรัม ย่อยด้วยกรดเข้มข้น hydrogen fluoride (HF) และกรดผสม ( $\text{HNO}_3$  และ  $\text{HCl}$ ; 1:3 v/v) อุณหภูมิ 110°C นาน 180 นาที หาปริมาณ Min-K โดยผลต่าง Total-K กับ  $\text{HNO}_3\text{-K}$  (Hosseini *et al.*, 2010)

### การสกัดโพแทสเซียมโดยวิธีลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP)

วิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Tessier *et al.* (1979) หาโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินซึ่งการสกัดวิธีนี้แบ่งโพแทสเซียมในดินแบ่งออกเป็น 5 รูป คือ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exch-K) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับคาร์บอเนต (Car-K) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ (Oxide-K) โพแทสเซียมที่ถูกจับกับอินทรีย์วัตถุ (OM-K) และโพแทสเซียมในรูปตะกอนตกค้าง (Res-K) ซึ่งรายละเอียดน้ำยาสกัดและปริมาณ อุณหภูมิ และเวลาในการสกัดโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 ทั้งนี้ในการสกัดโพแทสเซียมแบบลำดับขั้น จะชั่งดิน 1 g ที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 mm ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 mL จากนั้นนำมาเติมสารสกัดต่าง ๆ ตามรูปของโพแทสเซียมที่สกัดแบบลำดับขั้น (Table 3.2) นำสารสกัดมาแยกสารละลายกับอนุภาคดินโดยปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 rpm นาน 10 นาที จากนั้นใช้หลอดหยดดูดสารละลายส่วนใสไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 เพื่อป้องกันการสูญเสียของตะกอนดิน และเก็บสารละลายส่วนใสไปวัดความเข้มข้นของโพแทสเซียมรูปนั้น ๆ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และนำตะกอนที่เหลือมาล้างโดยใช้น้ำปราศจากไอออน 10 mL จากนั้นเขย่าด้วยมือ 1 นาที และนำไปหมุนเหวี่ยงเช่นเดิม ใช้หลอดหยดดูดสารละลายส่วนใสทิ้ง และนำตะกอนที่เหลือมาเติมสารสกัดโพแทสเซียมรูปถัดไป สำหรับการวิเคราะห์โพแทสเซียมตะกอนตกค้าง (Res-K) จะนำตะกอนที่ได้จากการสกัดโพแทสเซียมที่ถูกจับกับอินทรีย์วัตถุ (OM-K) ถ่ายลงในเทปลอนบีกเกอร์ นำไปอบเพื่อไล่ความชื้น และเติมกรด  $\text{HClO}_4$  : HF ในสัดส่วน 1:5 v/v และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ  $113\text{ }^{\circ}\text{C}$  จนกระทั่งดินมีสีขาว จากนั้นมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 และนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ทั้งนี้ผลรวมของปริมาณโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ เรียกว่าโพแทสเซียมทั้งหมด ( $\text{total}_{\text{pseudo-K}}$ )

**Table 3.2** Sequential extraction procedure for K fractionation.

STEP	K Form	Reagent	Action	Time	Temp.	Final volume (mL)
				(h.)	(°C)	
1	Exchangeable K (Exch-K)	8 mL 1 M MgCl <sub>2</sub> pH 7	Shaking	1	25	8
2	Carbonate (Car-K)	8 mL 1 M NaOAc pH 5	Shaking	1	25	8
3	Fe and Mn oxides (Oxide-K)	20-mL of 0.04 M NH <sub>2</sub> OH-HCl in 25% HOAc	Boiling	6	96	20
4	Organic matter (OM-K)	3 mL 0.02 M HNO <sub>3</sub> and 5 mL 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH 2	Boiling	2	85	20
		A second 3 mL 0.02 M HNO <sub>3</sub> and 5 mL 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , pH 2	Boiling	3	85	
5	Residual (Res-K)	After cooling, 5-mL 3.2 M NH <sub>4</sub> OAc in 20% HNO <sub>3</sub>	Digestion	Near dryness	105	25
		10 mL HF + 2 mL HClO <sub>4</sub>				

### การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโพแทสเซียม

นำสารสกัดสำหรับวิเคราะห์โพแทสเซียมวัดด้วยเครื่อง AAS อาศัยหลักการปลดปล่อยคลื่นแสงของอะตอม นอกจากนั้น วิเคราะห์ร้อยละการคืนกลับโพแทสเซียม (K recovery) ทหาร้อยละความถูกต้องของการวิเคราะห์โพแทสเซียมทั้ง 5 รูป โดยการนำดิน 1 g มาวิเคราะห์โพแทสเซียมทั้งหมด (totalK) ย่อยโดยใช้กรดผสมตามวิธีสกัดโพแทสเซียมในรูปตะกอนตกค้าง (Poonpakdee *et al.*, 2018) และยอมรับร้อยละการคืนกลับโพแทสเซียมอยู่ที่ในช่วงร้อยละ 15

$$K \text{ recovery} = \frac{\sum \text{Sequential extraction}}{\text{Total K}} \times 100$$

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลของรูปต่าง ๆ ของโพแทสเซียม ทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินที่สกัดโพแทสเซียมในดินทั้ง 2 วิธี มาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของ 3 ซ้ำ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ร้อยละการกระจายตัวของรูปโพแทสเซียม ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ของรูปโพแทสเซียมในดินกับสมบัติดิน และหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปของโพแทสเซียมในดินที่แบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชและรูปของโพแทสเซียมในดินที่สกัดได้แบบลำดับขั้น ด้วยวิธี Pearson's correlation

### ผลการทดลอง

#### สมบัติดิน

ดินปลูกยางในภาคใต้ที่ทำการศึกษานี้ทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดิน ส่วนใหญ่มีพีเอชเป็นกรดจัดถึงกรดเล็กน้อย (pH = 5.15 – 6.54) และมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ (0.01 dS m<sup>-1</sup>) และเมื่อวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุพบว่า กลุ่มดินเนื้อละเอียดมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่ากลุ่มเนื้อปานกลาง และเนื้อหยาบ (21.12, 13.68 และ 8.67 g kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ) นอกจากนี้ กลุ่มเนื้อดินละเอียดมีไนโตรเจนทั้งหมด แคลเซียมที่สกัดได้ แมกนีเซียมที่สกัดได้ และค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงกว่ากลุ่มเนื้อดินปานกลาง และหยาบ (Table 3.3)

**Table 3.3** Physicochemical properties of soil samples.

Soil	pH	EC	OM	Avai.P	Extr. Ca	Extr. Mg	Total N	CEC	Sand	Silt	Clay
textural group	(1:5)	(dS/m)	(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	(%)	(%)	(%)
<b>Coarse</b>											
(n=4)	5.15	0.01	8.67	3.90	30.14	38.96	0.53	1.60	80.00	8.00	12.00
±SD	0.11	0.00	2.29	0.63	39.65	57.73	0.23	0.44	8.72	5.01	4.18
<b>Medium</b>											
(n=4)	5.34	0.01	13.68	3.48	15.25	41.19	0.86	5.33	51.00	24.00	25.00
±SD	1.14	0.01	5.16	3.20	7.29	52.61	0.21	1.90	8.16	10.68	4.59
<b>Fine</b>											
(n=4)	6.54	0.01	21.12	5.48	319.67	265.20	1.27	10.75	20.00	28.00	52.00
±SD	1.12	0.01	2.79	5.71	318.30	364.51	0.24	1.19	13.62	11.89	19.37

### การสกัดโพแทสเซียมแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (single leaching extraction; SLE)

โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป Min-K, Fixed-K, Exch-K, และ Sol-K ตามลำดับ (Table 3.4) และดินในกลุ่มเนื้อละเอียดมีโพแทสเซียมในรูป Sol-K และ Exch-K สูงกว่าดินในกลุ่มเนื้อปานกลาง และหยาบ (Sol-K = 21.40, 9.13 และ 5.22 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ และ Exch-K = 37.89, 18.94 และ 7.22 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ) สอดคล้องกับโพแทสเซียมในรูป NH<sub>4</sub>OAc-K เป็นรูปที่พืชดูดไปใช้ได้ทันที ที่พบในกลุ่มดินเนื้อละเอียด (59.30 mg kg<sup>-1</sup>) มากกว่ากลุ่มดินเนื้อปานกลาง (28.07 mg kg<sup>-1</sup>) และกลุ่มดินเนื้อหยาบ (12.44 mg kg<sup>-1</sup>) เช่นเดียวกับ Fixed-K Min-K และ Total-K มีความเข้มข้นสูงในกลุ่มเนื้อดินละเอียด ปานกลาง และหยาบ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาร้อยละการกระจายตัวของโพแทสเซียมทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดิน พบว่า โพแทสเซียมส่วนใหญ่อยู่ในรูป Min-K คิดเป็นร้อยละ 94 ของ Total-K ในขณะที่โพแทสเซียมในรูป Sol-K, Exch-K และ Fixed-K รวมกันน้อยกว่าร้อยละ 6 ของ Total-K (Figure 3.1d)

การสกัดรูปโพแทสเซียมด้วยวิธี SLE เมื่อจำแนกตามอันดับดิน พบว่า มีร้อยละการกระจายตัวของโพแทสเซียมในรูป Min-K สูงถึงร้อยละ 95 - 99 ของ Total-K ในขณะที่ผลรวมร้อยละการกระจายตัวของ Fix-K, Exch-K และ Sol-K ต่ำกว่าร้อยละ 1-5 ของ Total-K ในทุกอันดับดิน โดยอันดับดิน Oxisols มีร้อยละการกระจายของ Sol-K และ Exch-K สูงกว่าในอันดับ Ultisols และ Entisols (Figure 3.3a)

### การสกัดโพแทสเซียมโดยวิธีลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP)

เมื่อสกัดโพแทสเซียมด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น พบว่า ดินเนื้อละเอียดมีปริมาณโพแทสเซียมในแต่ละรูปสูงกว่าในดินเนื้อปานกลาง และกลุ่มเนื้อหยาบ (Table 3.5) และส่วนใหญ่โพแทสเซียมอยู่ในรูป Res-K, Exch-K, Oxide-K, OM-K และ Car-K ตามลำดับ และทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินมีปริมาณโพแทสเซียมในรูป Car-K, Oxide-K และ OM-K ต่ำ ซึ่งโพแทสเซียมในรูป Car-K, Oxide-K และ OM-K มีปริมาณสูงในกลุ่มเนื้อดินละเอียด ปานกลาง และเนื้อหยาบ ตามลำดับ (Car-K = 1.65, 0.72 และ 0.29 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ, Oxide-K = 3.66, 2.95 และ 0.97 ตามลำดับ และ OM-K = 3.41, 2.06 และ 0.73 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ) นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ร้อยละของรูปโพแทสเซียม พบว่า ร้อยละส่วนใหญ่ของโพแทสเซียมในดินอยู่ในรูป Res-K ตามด้วย Exch-K, Oxide-K, OM-K และ Car-K ตามลำดับ โดยโพแทสเซียมในรูป Res-K มีร้อยละ 95 ของโพแทสเซียมทั้งหมด แต่ผลรวมของ Exch-K, Car-K, Oxide-K และ OM-K มีเพียงร้อยละ 1-5 ของโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน เมื่อจำแนกเป็นอันดับดิน พบว่า ร้อยละของโพแทสเซียมส่วนใหญ่อยู่ในรูป Res-K ถึง



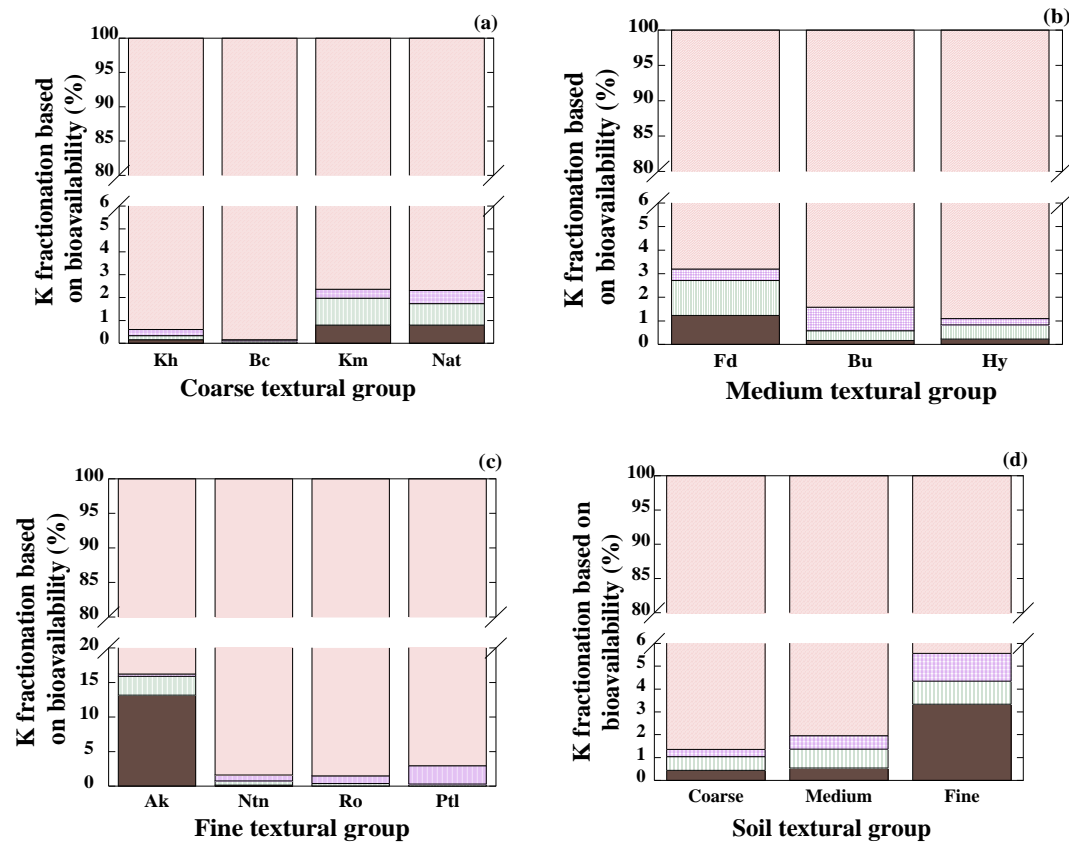
ร้อยละ 95–99 ของโพแทสเซียมทั้งหมด และในอันดับดิน Oxisols มีร้อยละของโพแทสเซียมในรูป Exch-K สูงกว่า ดินในอันดับดิน Ultisols และ Entisols (Figure 3.3b)

**Table 3.4** K speciation using single leaching extraction.

Soil textural group	K speciation based on bioavailability						Total-K (mg kg <sup>-1</sup> )
	Sol-K (mg kg <sup>-1</sup> )	Exch-K (mg kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> OAc-K (mg kg <sup>-1</sup> )	Fixed-K (mg kg <sup>-1</sup> )	HNO <sub>3</sub> -K (mg kg <sup>-1</sup> )	Min-K (mg kg <sup>-1</sup> )	
Coarse (n=4)	5.22	7.22	12.44	5.63	18.07	2776.54	2794.60
±SD	2.79	2.18	4.93	3.70	7.10	2339.33	2336.50
Medium (n=3)	9.13	18.94	28.07	26.07	54.14	3463.75	3517.89
±SD	1.92	8.41	9.80	34.79	44.11	2938.70	2981.00
Fine (n=4)	21.40	37.89	59.30	143.79	203.08	8187.35	8390.43
±SD	31.26	22.28	25.35	178.03	169.37	6012.51	6156.02

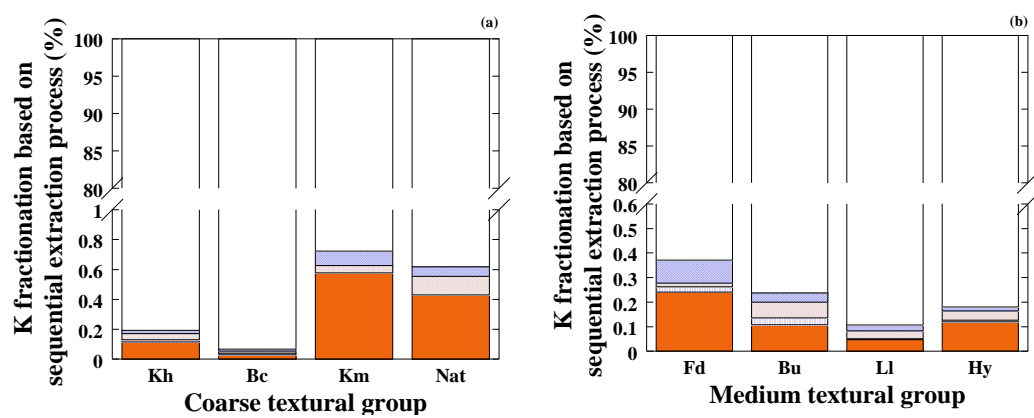
**Table 3.5** K speciation using sequential extraction process.

Soil textural group	K speciation based on sequential extraction process					
	Exch-K (mg kg <sup>-1</sup> )	Car-K (mg kg <sup>-1</sup> )	Oxide-K (mg kg <sup>-1</sup> )	OM-K (mg kg <sup>-1</sup> )	Res-K (mg kg <sup>-1</sup> )	Total <sub>pseudo</sub> -K (mg kg <sup>-1</sup> )
Coarse (n=4)	3.62	0.29	0.97	0.73	2747.64	2753.25
±SD	1.41	0.34	0.55	0.12	2283.56	2283.31
Medium (n=4)	5.59	0.72	2.95	2.06	7360.07	7371.38
±SD	3.10	0.82	2.73	1.73	7730.18	7737.21
Fine (n=4)	10.18	1.65	3.66	3.41	9346.77	9365.58
±SD	5.16	1.53	3.05	2.28	6711.36	6711.04



▨ Min-K   ▨ Fixed-K   ▨ Exch-K   ▨ Sol-K

Figure 3.1 K fractionation based on bioavailability in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural group and the average of K fractionation in soil textural group (d).



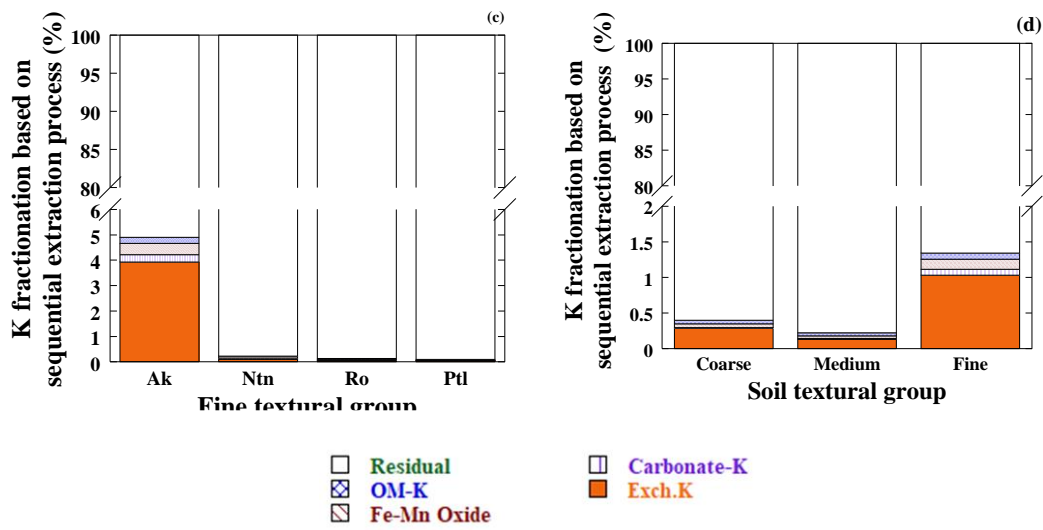


Figure 3.2 K fractionation based on sequential extraction process in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural group and the average of K fractionation in soil textural group (d).

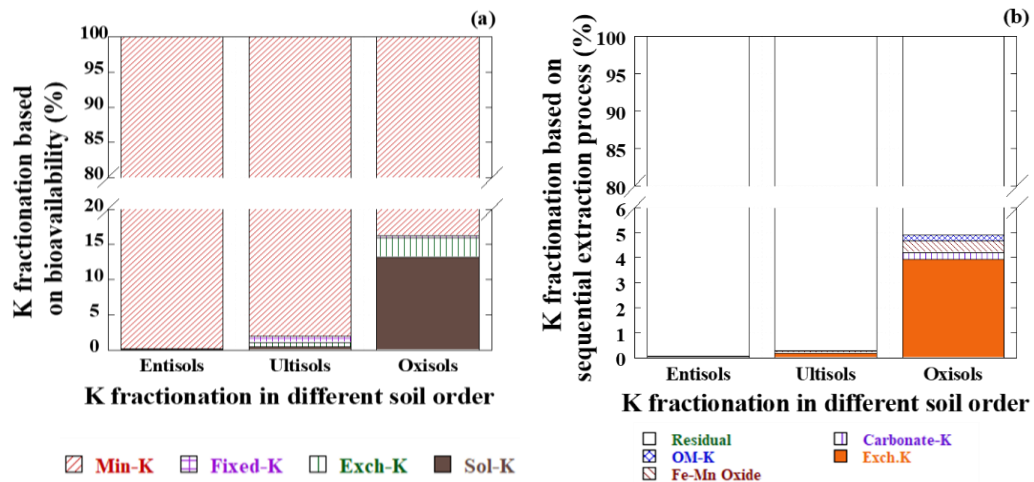


Figure 3.3 K fractionation based on bioavailability (a) and K fractionation based on sequential extraction process (b) the average of K fractionation in different soil order.

### สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างรูปโพแทสเซียม และสมบัติของดิน

Exch-K และ  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ OM ( $r = 0.649^{**}$  และ  $0.834^{**}$ ) และ CEC ( $r = 0.695^*$  และ  $0.852^{**}$ ) (Table 3.6) นอกจากนี้  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  และร้อยละของอนุภาคดินเหนียวมีความสัมพันธ์กันสูง ( $r = 0.808^{**}$ ) และ  $\text{HNO}_3\text{-K}$  แสดงความสัมพันธ์เชิงบวกกับร้อยละของอนุภาคดินเหนียว ( $r = 0.640^*$ ) ในขณะที่ปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดแบบลำดับขั้น (SEP) พบว่า Exch-K มีความสัมพันธ์สูงกับ OM ( $r = 0.778^{**}$ ), CEC ( $r = 0.735^*$ ) และอนุภาคดินเหนียว ( $r = 0.768^{**}$ ) และพบความสัมพันธ์ของ Car-K กับ pH ของดิน ( $r = 0.749^{**}$ ) และ Extr. Ca ( $r = 0.760^{**}$ ) ในทำนองเดียวกัน OM-K ที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับ pH ของดิน ( $r = 0.632^*$ ) และ อนุภาคทรายแป้ง ( $r = 0.740^{**}$ ) (Table 3.7)

**Table 3.6** The correlation coefficient (r) between K speciation based on bioavailability and soil properties.

Soil properties	Sol-K	Exch-K	$\text{NH}_4\text{OAc-K}$	Fixed-K	$\text{HNO}_3\text{-K}$	Min-K	Total-K
pH	-0.175	0.820 <sup>**</sup>	0.468	0.477	0.531	0.326	0.331
EC	0.610 <sup>*</sup>	-0.211	0.287	-0.319	-0.238	-0.386	-0.385
OM	0.504	0.649 <sup>*</sup>	0.834 <sup>**</sup>	0.363	0.498	0.360	0.364
CEC	0.482	0.695 <sup>*</sup>	0.852 <sup>**</sup>	0.433	0.566	0.176	0.184
Total N	0.402	0.725 <sup>**</sup>	0.816 <sup>**</sup>	0.299	0.436	0.312	0.316
Avail. P	0.547	0.164	0.514	-0.348	-0.220	-0.132	-0.135
Extr. Ca	0.334	0.689 <sup>*</sup>	0.740 <sup>**</sup>	-0.02	0.127	0.031	0.033
Extr. Mg	0.970 <sup>**</sup>	0.33	0.724 <sup>**</sup>	-0.162	-0.007	-0.143	-0.142
Sand (%)	-0.423	-0.648 <sup>*</sup>	-0.775 <sup>**</sup>	-0.597 <sup>*</sup>	-0.702 <sup>*</sup>	-0.238	-0.247
Silt (%)	-0.179	0.703 <sup>*</sup>	0.380	0.614 <sup>*</sup>	0.549	0.397	0.403
Clay (%)	0.680 <sup>*</sup>	0.438	0.808 <sup>**</sup>	0.424	0.640 <sup>*</sup>	0.075	0.083

**Remark:** <sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup> Correlation is significant at the  $p \leq 0.01$  and  $0.05$  level respectively.

**Table 3.7** The correlation coefficient (r) between K speciation based on sequential extraction process and soil properties.

Soil properties	Exch-K	Car-K	Oxide-K	OM-K	Res-K	Total-K <sub>pseudo</sub>
pH	0.344	0.749**	0.674*	0.632*	0.552	0.553
EC	0.275	-0.154	-0.289	-0.395	-0.445	-0.445
OM	0.778**	0.555	0.648*	0.553	0.435	0.436
CEC	0.735**	0.554	0.406	0.499	0.339	0.339
Total N	0.690*	0.592*	0.686*	0.489	0.403	0.403
Avail. P	0.494	0.416	0.284	-0.272	-0.183	-0.182
Extr. Ca	0.640*	0.760**	0.659*	0.125	0.154	0.155
Extr. Mg	0.822**	0.236	0.136	-0.12	-0.195	-0.194
Sand (%)	-0.669*	-0.491	-0.301	-0.647*	-0.396	-0.374
Silt (%)	0.214	0.475	0.465	0.740**	0.569	0.182
Clay (%)	0.768**	0.368	0.119	0.414	0.182	0.569

**Remark:** \*\*, \* Correlation is significant at the  $p \leq 0.01$  and  $0.05$  level respectively.

ความสัมพันธ์สูงระหว่างรูปของโพแทสเซียมที่สกัดโดยวิธี SLE และ SEP (Table 3.8) ในการสกัดโพแทสเซียมด้วยวิธี SLE นั้น NH<sub>4</sub>OAc-K มีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงกับ Sol-K ( $r = 0.690^*$ ) และ Exch-K ( $r = 0.693^*$ ) ในขณะที่การสกัดด้วยวิธี SEP พบว่าผลรวมของ Exch-K และ Car-K ที่สกัดได้มีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงมาก ( $r = 0.986^{**}$ ) กับโพแทสเซียมที่สกัดด้วย NH<sub>4</sub>OAc-K จากวิธี SLE นอกจากนี้ Fixed-K ก็พบมีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงกับ OM-K ( $r = 0.952^{**}$ ), Res-K ( $r = 0.814^{**}$ ) เช่นเดียวกับ Min-K พบว่า มีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงมีกับ Res-K ( $r = 0.948^{**}$ )

**Table 3.8** The correlation coefficient (r) between K speciation extracted using single leaching process and sequential extraction process.

K speciation	Sol-K	Exch-K	NH <sub>4</sub> OAc- K	Fixed-K	HNO <sub>3</sub> -K	Min-K
Exch-K	-0.044					
NH <sub>4</sub> OAc-K	0.690*	0.693*				
Fixed-K	-0.191	0.618*	0.310			
HNO <sub>3</sub> -K	-0.041	0.706*	0.482	0.982**		
Min-K	-0.123	0.514	0.284	0.680*	0.682*	
Total K	-0.122	0.520	0.289	0.682*	0.691*	1.000**

K speciation	Exch-K	Car-K	Oxide-K	OM-K	Res-K
Car-K	0.634*				
Oxide-K	0.539	0.680*			
OM-K	0.315	0.429	0.450		
Res-K	0.252	0.420	0.623*	0.910**	
Total-K <sub>pseudo</sub>	0.253	0.421	0.624*	0.910**	1.000**

**Remark:** \*\*, \* Correlation is significant at the  $p \leq 0.01$  and  $0.05$  level respectively.

**Table 3.9** The correlation coefficient (r) between K speciation based on SLE and SEP.

K speciation	Sol-K	Exch-K	NH <sub>4</sub> OAc-K	Fixed-K	HNO <sub>3</sub> -K	Min-K	Total K
Exch-K	0.808**	0.51	0.953**	0.208	0.379	0.237	0.241
Car-K	0.187	0.827**	0.734**	0.319	0.438	0.26	0.264
Exch-K + Car-K	0.727**	0.612*	0.986**	0.246	0.416	0.257	0.261
Oxide-K	0.109	0.729**	0.607*	0.193	0.297	0.607*	0.605*
Exch-K + Car-K + Oxide-K	0.578*	0.715**	0.935**	0.251	0.415	0.409	0.411
OM-K	-0.146	0.729**	0.423	0.925**	0.960**	0.787**	0.794**
Exch-K + Car-K + Oxide-K + OM-K	0.47	0.800**	0.919**	0.448	0.593*	0.546	0.549
Res-K	-0.215	0.698*	0.351	0.814**	0.819**	0.948**	0.950**
Total-K <sub>pseudo</sub>	-0.215	0.699	0.352	0.814*	0.819*	0.948**	0.950**

Remark: \*\*, \* Correlation is significant at the  $p \leq 0.01$  and  $0.05$  level respectively.

## วิจารณ์ผลการทดลอง

### รูปโพแทสเซียมสกัดด้วยวิธีแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (SLE)

Min-K (Figure 1) มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 95 ของโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน ซึ่ง Min-K เป็นองค์ประกอบของแร่ปฐมภูมิรวมไปถึงแร่ทุติยภูมิ Min-K เป็นรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที แต่จะเป็นประโยชน์เมื่อแร่ฟอสเฟตสลายตัวและปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมา (Brady and Weil, 2008; Zörb *et al.*, 2014) มีรายงานว่าแบคทีเรียบางกลุ่ม เช่น แบคทีเรียละลายโพแทสเซียม (potassium solubilizing bacteria; KSB) สามารถหลังกรดอินทรีย์ที่ขับออกมาเพื่อละลายแร่ที่มีโพแทสเซียม และทำให้แร่เกิดการปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาในสารละลายในดิน (Zörb *et al.*, 2014)

ดินในกลุ่มดินเนื้อละเอียดมีปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์มากกว่าดินกลุ่มดินเนื้อปานกลาง และหยาบ (Table 3.2) อย่างไรก็ตาม ในระยะยาวหากดินเนื้อละเอียดที่ใช้ปลูกพืชไม่มีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม อาจทำให้ดินเนื้อละเอียดมีปริมาณของโพแทสเซียมที่สามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ต่ำได้เช่นเดียวกัน (Poonpakdee *et al.*, 2013) ดินมีกลไกในการรักษาระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมในดิน กล่าวคือ เมื่อดินมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชลดต่ำลง เนื่องจากการดูดกินของพืชหรือสูญเสียดินออกจากหน้าตัดดินโดยกระบวนการชะละลาย โพแทสเซียมในส่วนที่ตรึง (Fixed-K) ก็จะมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาสู่ดินเพื่อเป็นการเพิ่มระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Li *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม พืชบางสายพันธุ์ เช่น กล้วยาเนเปียร์ (elephant

grass) (Brady and Weil, 2008) หญ้าไรซ์ (Li *et al.*, 2015) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ผักกาดกวางตุ้ง และ ถั่วแกลแฟลฟา (Wang *et al.*, 2020) มีกลไกพิเศษโดยการหลังกรดอินทรีย์บริเวณราก เพื่อให้กรดอินทรีย์ไปละลายแร่ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบทำให้แร่เกิดการผุพังและปลดปล่อยโพแทสเซียมจากที่ไม่เป็นประโยชน์สู่พืชให้พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Zörb *et al.*, 2014) ดังนั้นอาจเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินที่มี Min-K สูงได้

$\text{NH}_4\text{OAc-K}$  เป็นโพแทสเซียมที่สกัดได้ และเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Zörb *et al.*, 2014)  $\text{NH}_4\text{OAc}$  เป็นผลรวมความเข้มข้นของโพแทสเซียมในรูป Sol-K และ Exch-K (Helmke and Sparks, 1996) โดยทั่วไปแล้ว  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  มักพบความสัมพันธ์เชิงบวกกับ Sol-K และ Exch-K เนื่องจาก สารสกัด 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  Sol-K และ EXch-K ออกมาได้ และ ประมาณร้อยละ 90 ที่สกัดได้พบว่าโพแทสเซียมอยู่ในรูป Exch-K (Brady and Weil, 2008) Exch-K เป็นโพแทสเซียมไอออนที่ดูดซับโดยประจุไฟฟ้าลบบริเวณพื้นผิวของอนุภาคดินเหนียวและอินทรีย์วัตถุ (Havlin *et al.*, 2005) โพแทสเซียมในรูป Sol-K และ Exch-K สามารถถูกแทนที่การดูดซับในดินตลอดจนการชะละลายและสูญเสียออกจากพื้นที่ดิน โดยการแทนที่ของแคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ เช่น  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$  และอื่น ๆ (Zörb *et al.*, 2014) โดยทั่วไป Water-K ในดินอาจถูกเรียกว่าโพแทสเซียมในสารละลายดิน (Helmke and Sparks, 1996) ในการศึกษาโพแทสเซียมที่สกัดได้ด้วย  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ในกลุ่มดินเนื้อหยาบ และปานกลาง มีความเข้มข้นต่ำกว่ากลุ่มดินเนื้อละเอียด และ  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ที่สกัดได้พบว่า กลุ่มดินเนื้อหยาบและปานกลางมี  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมสำหรับดินปลูกยางพารา ( $40\text{-}80 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Rubber Research Institute, 2018) ในขณะที่  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ในดินเนื้อละเอียด พบว่า มีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่เหมาะสม (Table 3.4)

### รูปของโพแทสเซียมที่สกัดด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับชั้น (SEP)

ความเข้มข้นของโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินเพิ่มขึ้นในดินที่อยู่ในกลุ่มดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียดตามลำดับ และ โพแทสเซียมที่พบมากอยู่ในรูป  $\text{Res-K} > \text{Exch-K} > \text{Oxide-K} > \text{OM-K} > \text{Car-K}$  ตามลำดับ ความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exch-K) ที่สกัดด้วยวิธี SEP พบว่า Exch-K ที่สกัดได้มีความเข้มข้นต่ำกว่าโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ ( $\text{NH}_4\text{OAc-K}$ ) ที่ได้ด้วยวิธี SLE เนื่องจาก  $\text{NH}_4^+$  ในสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OAc}$  เข้าไปไล่ที่  $\text{K}^+$  ที่ถูกดูดซับบริเวณผิวคอลลอยด์ดินได้ดีกว่าเนื่องจากขนาดแคตไอออน (hydrated size) ของ  $\text{NH}_4^+$  ( $54 \text{ nm}^3$ ) มีรัศมีไอออนใกล้เคียงกับ  $\text{K}^+$  ( $53 \text{ nm}^3$ ) ในขณะที่ขนาดของไอออน  $\text{Mg}^{2+}$  ( $108 \text{ nm}^3$ ) จากสารละลาย  $\text{MgCl}_2$  (Brady and Weil, 2008) มีขนาดใหญ่กว่าจึงทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนและแทนที่ของไอออนได้ต่ำกว่า  $\text{NH}_4^+$



ยิ่งไปกว่านั้นน้ำยาสกัด  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ไม่เพียงแต่ สกัด Water-K และ Exch-K เท่านั้น แต่ยังสกัดไอออนที่ถูกจับกับสารประกอบคาร์บอเนตให้ออกมาได้อีกด้วย (Cheng *et al.*, 2011) สอดคล้องกับการศึกษาที่พบว่า ผลรวมความเข้มข้นของ Exch-K และ Car-K ที่สกัดได้จากวิธี SEP มีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงกับ  $\text{NH}_4\text{OAc}$ -K ที่สกัดได้จาก SLE ( $r = 0.97$ ) ในขณะที่ผลรวมความเข้มข้นของ Oxide-K และ OM-K มีความสัมพันธ์สูงกับ Fixed-K ( $r = 0.92$ ) (Figure 3.4)

ธาตุที่ถูกจับกับคาร์บอเนตจะค่อย ๆ กลายเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชให้พืชสามารถดูดนำไปใช้ได้ (Cheng *et al.*, 2011) ในดินเขตร้อนที่มีพีเอชต่ำสารประกอบคาร์บอเนตสามารถพบได้น้อยในดิน ธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของสารคาร์บอเนตสามารถถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายเมื่อดินมีพีเอชเป็นกรดสอดคล้องกับสารสกัดโลหะที่ถูกจับกับสารประกอบคาร์บอเนตที่พบว่า การใช้กรดอ่อนในการสกัด (Kaplan *et al.*, 2011) ในดินที่ศึกษาพบ Car-K ต่ำกว่าร้อยละ 0.015 ในทุกกลุ่มเนื้อดิน (Figure 3.2) ในขณะที่ดินเนื้อปูนมีปริมาณคาร์บอเนตสูงกว่าดินกรด (Ntlopo *et al.*, 2022) คาร์บอเนตมักพบในพื้นที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้งที่มีปริมาณน้ำฝนน้อย (Brady and Weil, 2008) ในขณะที่ Oxide-K เป็นโพแทสเซียมที่ถูกจับกับพันธะกับอะตอมของเหล็ก และแมงกานีส เกิดเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) แล้วเคลือบกับอนุภาคของดิน (Brady and Weil, 2008) ดินที่ศึกษาพบการกระจายของโพแทสเซียมรูป Oxide-K ต่ำ (0.01–0.45%) ทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดิน (Figure 3.2) แต่ในกลุ่มดินเนื้อละเอียดมีความเข้มข้นของ Oxide-K มากที่สุด เนื่องจากชุดดินอ่าวลึก (Ak) ถูกจัดอยู่ในอันดับออกซิซอลส์ (Oxisols) ซึ่งเป็นดินที่มีการสะสมเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Figure 3.3b) ส่งผลให้ดินมีสีแดงจัด ในขณะที่ OM-K เป็นโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ได้จากวัสดุอินทรีย์เศษซากพืช และสิ่งมีชีวิต เมื่ออินทรีย์วัตถุเกิดการย่อยสลาย ก็จะมีการปลดปล่อยธาตุอาหารรวมทั้งธาตุโพแทสเซียมเพื่อให้พืชและจุลินทรีย์ในดินนำไปใช้ (Tessier *et al.*, 1979) Res-K ส่วนใหญ่เป็นองค์ประกอบของแร่สารปฐมภูมิและทุติยภูมิ โพแทสเซียมรูปนี้เป็นโพแทสเซียมที่ถูกจับกับพันธะทางเคมีกับธาตุหรือสารประกอบอื่น ๆ อย่างแข็งแรง โพแทสเซียมในส่วนนี้เป็นส่วนที่ตกค้างไม่สามารถใช้สารสกัดเกลือหรือกรดอ่อน ๆ สกัด โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบออกมาได้เหมือนกับ Min-K โพแทสเซียมในรูปนี้เป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที แต่โพแทสเซียมในรูปนี้จะเปลี่ยนเป็นประโยชน์ต่อพืชเมื่อแร่มีการผุพังสลายตัว อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวในธรรมชาติอาจใช้เวลานาน และเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้น โพแทสเซียมในรูปนี้จึงมักปลดปล่อยออกมาไม่ทันต่อความต้องการของพืชอายุสั้น SEP อาจเป็นวิธีการหนึ่งในการประเมินความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินและสามารถบ่งชี้ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่โพแทสเซียมถูกจับอยู่กับสารประกอบคาร์บอเนต อินทรีย์วัตถุ ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนดความเป็นประโยชน์ การละลาย และการตกตะกอนของรูปโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้

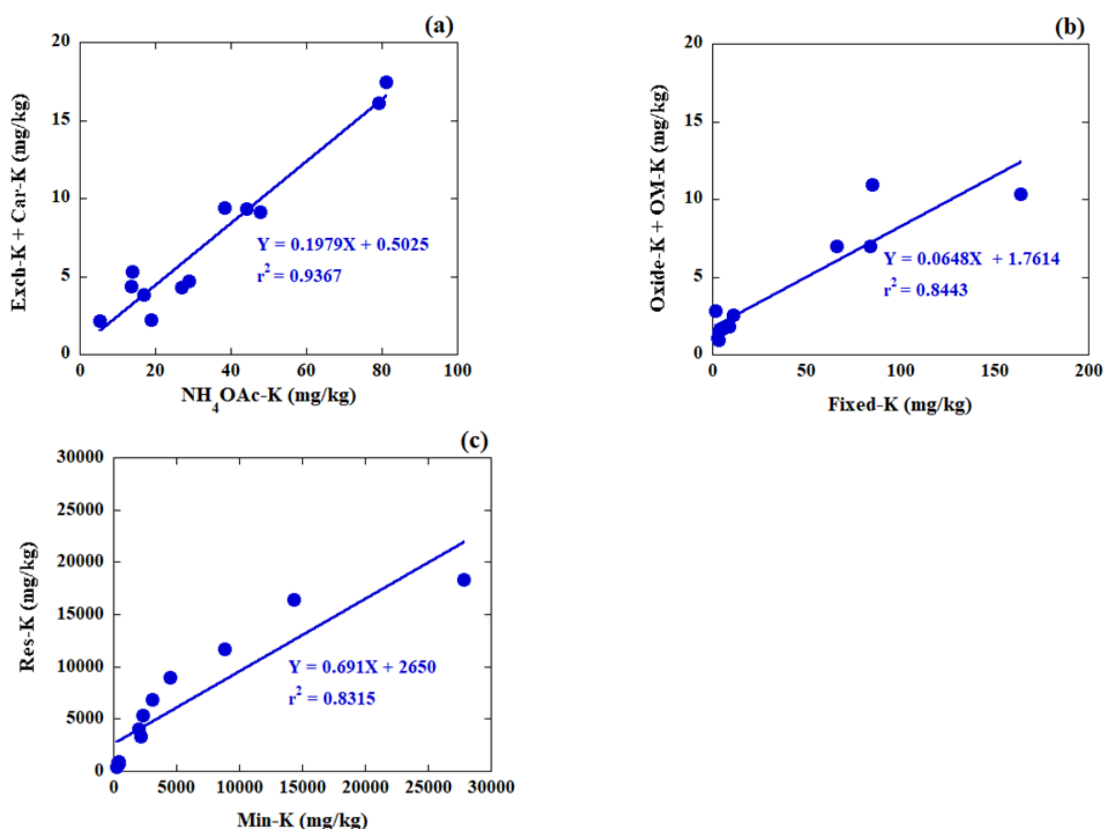


Figure 3.4 The correlation coefficient ( $r$ ) between K speciation by SLE and SEP

### ความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ กับสมบัติของดิน

ความสัมพันธ์ของโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชที่สกัดโดยวิธี SLE และ SEP พบว่ามีความสัมพันธ์สูง นอกจากนั้น NH<sub>4</sub>OAc-K ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกกับ OM, CEC อนุภาคดินเหนียว Ca และ Mg เนื่องจากผิวของคอลลอยด์ดินของอนุภาคดินเหนียวและผิวคอลลอยด์ของอินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งประจุลบทางไฟฟ้า ดังนั้น บริเวณผิวคอลลอยด์จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับของแคตไอออน (Table 3.6 และ 3.7) Sol-K มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ EC เนื่องจากเกลือจากอิทธิพลของปุ๋ยโพแทสเซียม สอดคล้องกับการศึกษาที่พบความสัมพันธ์ระหว่าง Sol-K และ EC<sub>e</sub> (Hosseini et al., 2010) ในขณะที่ Exch-K มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ pH เนื่องจากคอลลอยด์ดินส่วนใหญ่ที่ทำการศึกษาคือ เป็นประเภทที่ประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ pH เมื่อดินมี pH สูง ทำให้คอลลอยด์ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง ส่งผลให้ดูดซับ K<sup>+</sup> ได้มากขึ้น (Brady and Weil, 2008) แต่ดินที่มี pH ต่ำ จะมี H<sup>+</sup> และ Al<sup>3+</sup> อยู่มาก ซึ่งประจุเหล่านี้จะไปไล่ที่แคตไอออนอื่นๆ ที่เกาะอยู่บริเวณคอลลอยด์ดิน ซึ่งรวม K<sup>+</sup> ด้วย ทำให้ลดการดูดซับของโพแทสเซียม นอกจากนั้น Fixed-K,

$\text{HNO}_3\text{-K}$  และ  $\text{OM-K}$  พบความสัมพันธ์เชิงลบกับอนุภาคทราย แต่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอนุภาคทรายแป้ง และอนุภาคดินเหนียว อนุภาคทราย ส่วนใหญ่เป็นแร่ควอตซ์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีพื้นผิวจำเพาะต่ำทำให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำและดูดซับธาตุอาหารได้ต่ำ (Brady and Weil, 2008) ในสภาพภูมิอากาศภาคใต้ของไทยที่ร้อนชื้นส่งเสริมการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุได้ดี (Carter, 2002) สอดคล้องกับที่พบความเข้มข้นของ  $\text{OM-K}$  ต่ำ (Table 3.5)

### การจัดการโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย

ดินที่ปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย พบว่า ดินมีระดับโพแทสเซียมต่ำ (Ntlopo *et al.*, 2022) รวมไปถึงดินปลูกยางพาราเชิงเดี่ยวและดินปลูกพืชร่วมยางพารา (Saeteng *et al.*, 2022) ดังนั้น การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารายังคง ถือเป็นสิ่งสำคัญในการจัดการดินปลูกยางพาราในภาคใต้ โดยเฉพาะดินปลูกยางพาราที่มีเนื้อดินหยาบซึ่งโดยทั่วไปมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช และโพแทสเซียมที่แหล่งสำรองในดิน (Fixed-K และ Min-K) ต่ำกว่าดินเนื้อละเอียด ดังนั้น ปริมาณปุ๋ยตามคำแนะนำกับยางพาราที่ปลูกในกลุ่มดินหยาบมีอัตราสูงกว่ากลุ่มดินเนื้อละเอียด (Rubber research institute, 2008)

ปริมาณการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในกลุ่มดินเนื้อหยาบควรสูงกว่ากลุ่มเนื้อดินละเอียด เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ให้โพแทสเซียมในดิน รวมทั้งใส่โพแทสเซียมให้มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของยางพารา นอกจากนั้น ควรมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์เพื่อปรับปรุงสมบัติดิน เพื่อความสามารถของดินในดูดซับแคตไอออน รวมทั้งเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน ทั้งนี้การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์มีความสำคัญในการจัดการดินปลูกยางพาราในภาคใต้ รูปของโพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่ อยู่ในรูป Min-K หรือ Res-K สูง (Figure 3.3) ดังนั้น การใช้ปุ๋ยชีวภาพโดยใช้แบคทีเรียละลายโพแทสเซียมอาจเป็นแนวทางในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินปลูกยางได้ นอกจากนั้น ยังเป็นการประหยัดปุ๋ยโพแทสเซียมและลดต้นทุนสำหรับการจัดการโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ดินปลูกยางพาราที่มีเนื้อดินหยาบ ปานกลาง และละเอียด ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที มากกว่าร้อยละ 95 ของโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน ความเข้มข้นของโพแทสเซียมทั้งหมดในดินและโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของโพแทสเซียมในดินที่สกัดโดยวิธีแบ่งตามความเป็นประโยชน์ของพืช (SLE) พบว่า โพแทสเซียมในรูป  $\text{Min-K} > \text{Fixed-K} > \text{Exch-K} > \text{Sol-K}$  ส่วนวิธีการสกัดโพแทสเซียมตามลำดับชั้น (SEP) พบว่า  $\text{Res-K} > \text{Exch-K} > \text{Oxide-K} > \text{OM-K} > \text{Car-K}$  พบความสัมพันธ์สูงระหว่างรูปของโพแทสเซียมที่สกัดได้โดยวิธี SLE และ

SEP นอกจากนั้น โปแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินมีความสัมพันธ์สูงกับ OM, CEC และอนุภาคดินเหนียว การสกัดโปแทสเซียมด้วยวิธี SEP ไม่เพียงแต่เป็นการสกัดโปแทสเซียมเพื่อประเมินระดับของโปแทสเซียมเท่านั้น แต่ปริมาณของโปแทสเซียมที่สกัดได้ยังพบความสัมพันธ์สูงมากกับ SLE โดยพบว่า ผลรวมของ Exch-k และ Car-K มีความสัมพันธ์กับ  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ( $r^2=0.9367$ ) นอกจากนั้น ผลรวม Oxide-K และ OM-K มีความสัมพันธ์กับ Fixed-K ( $r^2=0.8443$ ) และ Res-K พบความสัมพันธ์กับ Min-K ( $r^2=0.8315$ ) ดังนั้น SEP สามารถประเมินความเป็นประโยชน์ของโปแทสเซียมได้เช่นเดียวกับ SLE ดังนั้น SEP อาจเป็นวิธีการหนึ่งในการประเมินความเป็นประโยชน์ของโปแทสเซียมในดินและสามารถบ่งชี้ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่โปแทสเซียมถูกจับอยู่กับสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์วัตถุ ออกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เป็นตัวกำหนดความเป็นประโยชน์ การละลาย และการตกตะกอนของรูปโปแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ จากการประเมินความเป็นประโยชน์ของโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินปลูกยาง พบว่า โปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินปลูกยางอยู่ในระดับต่ำกว่าที่เหมาะสม ดังนั้น การใช้ปุ๋ยโปแทสเซียมจึงมีความสำคัญอย่างมาก นอกจากนั้น หากมีการนำปุ๋ยอินทรีย์เพิ่มความเป็นประโยชน์โปแทสเซียมหรือแบคทีเรียที่มีความสามารถในการละลายแร่โปแทสเซียมในดินเพื่อเปลี่ยนโปแทสเซียมจากรูปที่พืชดูดนำไปใช้ไม่ได้ให้กลายเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชก็อาจเป็นการช่วยลดต้นทุนการใช้ปุ๋ยโปแทสเซียมในดินปลูกยางพาราได้

## บทที่ 4

### การตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย

#### บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยโดยมีพื้นที่ปลูก 24.46 ล้านไร่ กระจายทั่วประเทศ (Office of Agricultural Economics, 2021) โดยเฉพาะภาคใต้ที่มีพื้นที่ปลูก 14.19 ล้านไร่ ยางพาราจะเจริญเติบโตดีและให้ผลผลิตสูงจำเป็นต้องได้รับโพแทสเซียม (K) อย่างเพียงพอ โพแทสเซียมมีบทบาทช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์อะดีโนซีนไตรฟอสฟาเทส (ATPase) ซึ่งช่วยเคลื่อนย้ายซูโครสที่เป็นสารตั้งต้นในการสร้างน้ำยางพาราเข้าสู่ท่ออาหารและสังเคราะห์ยาง กระตุ้นเอนไซม์ไพรูเวตคิเนสเพื่อเปลี่ยน phosphoenolpyruvate (PEP) เป็นไพรูเวตในกระบวนการไกลโคไลซิสที่ใช้สร้างน้ำยาง (Jacob *et al.*, 1989) เมื่อยางพาราได้รับโพแทสเซียมเพียงพอ พบว่ายางพาราก่อนเปิดกรีดโตดีขึ้น ส่วนยางพาราลงเปิดกรีดสร้างเปลือกใหม่เร็วขึ้นและปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น (Kungpisdan, 2009) ยางพาราที่ได้รับโพแทสเซียมไม่เพียงพอจะแสดงอาการใบเหลืองซีดเริ่มจากขอบใบและยอด (Kungpisdan, 2007) แต่เมื่อได้รับโพแทสเซียมมากเกินไปส่งผลให้ดูดใช้แคลเซียม และแมกนีเซียมลดลง (Pongthai *et al.*, 2017)

โพแทสเซียมในดินเมื่อแบ่งตามความเป็นประโยชน์ต่อพืชแบ่งเป็น 4 รูป คือ โพแทสเซียมในสารละลายดิน โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ โพแทสเซียมที่ถูกตรึง และโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (Brady and Weil, 2008) รูปที่พืชสามารถดูดนำไปใช้ได้ทันที คือ โพแทสเซียมในสารละลายดินและที่แลกเปลี่ยนได้ ในขณะที่โพแทสเซียมที่ถูกตรึงเป็นรูปที่ค่อย ๆ เป็นประโยชน์ต่อพืชและโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่พืชไม่สามารถดูดนำไปใช้ได้ทันที โพแทสเซียมทั้ง 4 รูปในดินมีสมดุลแบบเปลี่ยนกลับได้ กล่าวคือ ดินมีสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียม เมื่อโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินลดลงและไม่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม โพแทสเซียมที่ถูกตรึงจะมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาเพื่อเพิ่มโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินอันเป็นการรักษาสมดุลโพแทสเซียม (Brady and Weil, 2008) ในทางกลับกัน เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมซึ่งเป็นการเพิ่มโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน ดินจะมีการตรึงโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ส่วนหนึ่งไว้ และจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์เมื่อดินมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำ

ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีทั้งดินเนื้อหยาบและเนื้อละเอียด ดินในภาคใต้ส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในอันดับ Entisols (Kheoruenromne and Vijansorn, 2003) ดินในอันดับนี้เป็นดินที่มีพัฒนาการสูง ดินชั้นล่างมีการสะสมอนุภาคดินเหนียว ดินมีร้อยละความอิ่มตัวด้วยเบสต่ำกว่า 35 และดินส่วน

ใหญ่มีแร่ดินเหนียวชนิดเคโอลิไนต์ที่มีกิจกรรมต่ำเป็นหลัก จากสภาพภูมิอากาศของภาคใต้ที่ร้อนชื้น ฝนตกชุก ดินสูญเสียธาตุอาหารโดยเฉพาะโพแทสเซียมออกจากดินได้ง่ายโดยกระบวนการชะละลาย ส่งผลให้ดินปลูกยางพาราในภาคใต้ส่วนใหญ่มีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ (Kitprasong *et al.*, 2020; Damrongrak *et al.*, 2015)

การจัดการโพแทสเซียมให้เพียงพอต่อความต้องการของยางพาราจึงมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิต การเข้าใจถึงความสามารถของดินในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมซึ่งประกอบด้วย การตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมจึงมีความสำคัญในการจัดการปุ๋ยโพแทสเซียม แม้มีรายงานถึงความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงระดับโพแทสเซียมในดินปลูกอ้อย (Darunsontaya *et al.*, 2018) และการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกข้าว (Darunsontaya *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานความสามารถของดินในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ ดังนั้น จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพในการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ เพื่อเป็นแนวทางการจัดการความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราที่มีเนื้อดินแตกต่างกัน

## อุปกรณ์และวิธีการ

### การเก็บและเตรียมตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และแร่วิทยา

เก็บดินที่มีเนื้อดินในกลุ่มเนื้อดินหยาบ ปานกลาง และละเอียดที่ใช้ปลูกยางพาราที่ความลึก 0-30 เซนติเมตร (Kungpisan, 2008) กลุ่มละ 4 ชุดดิน โดยกลุ่มดินเนื้อละเอียด ได้แก่ ชุดดินอ่าว ลีค (AK), นาทอน (Ntn), รือเสาะ (Ro) และพัทลุง (PtL) ดินกลุ่มเนื้อปานกลาง ได้แก่ ชุดดินฝั่งดิน (Fd), สายบุรี (Bu), ลำภูรา, (LL) และหาดใหญ่ (Hy) และดินกลุ่มเนื้อหยาบ ได้แก่ ชุดดินคองหงษ์ (Kh), บาเจาะ (Bc), คลองท่อม (Km), และนาทวี (Nat) ฝั่งดินให้แห้งในที่ร่ม บด และร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิด 2 มิลลิเมตร เพื่อวิเคราะห์พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า (ดิน:น้ำ, 1:5) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์โดยวิธี Bray II ไนโตรเจนทั้งหมดในดินโดยวิธี Kjeldahl ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมที่สกัดได้โดย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7 ส่วนดินที่ร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิด 0.5 มิลลิเมตรใช้วิเคราะห์อินทรียวัตถุโดยวิธี Walkley-Black ตามคู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช (Onthong and Poonpakdee, 2020) เนื้อดินโดยวิธี Hydrometer (Gee and Bauder, 1986) และชนิดแร่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยนำดินมาทำจัดสารเชื่อม ทำให้อนุภาคดินเหนียวอิมมัลชันด้วยแมกนีเซียมและโพแทสเซียม จากนั้นนำมาเข้าเครื่อง X-Ray

Diffraction (XRD) นำตัวอย่างที่อิมั้วด้วยโพแทสเซียมไปเผา ส่วนตัวอย่างที่อิมั้วด้วยแมกนีเซียมนำมาทำให้อิมั้วด้วยกลีเซอรอล (glycerol) แล้วนำเข้าเครื่อง XRD ด้วยเทคนิคระยะห่างระหว่างผลึก (Whitting, 1965)

### การวิเคราะห์โพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดิน

วิเคราะห์โพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดิน (Helmke and Sparks, 1996) ได้แก่ 1) โพแทสเซียมในสารละลายดิน (Sol-K) โดยสกัดด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) 2) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exch-K) สกัดด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  นำสารละลายที่ผ่านการกรองวัดโพแทสเซียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) โดยหักลบกับ Sol-K (Thomas, 1982) 3) โพแทสเซียมที่สกัดได้ ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ -K) เป็นผลรวมของ Sol-K และ Exch-K 4) โพแทสเซียมที่ถูกตรึง (Fixed-K) 5) โพแทสเซียมที่สกัดด้วยกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ -K) คำนวณ Fixed-K จากผลต่างโพแทสเซียมที่สกัดได้โดย  $\text{HNO}_3$ -K กับ  $\text{NH}_4\text{OAc}$ -K 6) โพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (Min-K) และ 7) โพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Total-K) โดยย่อยดินด้วยกรดผสม (HF และ  $\text{HNO}_3+\text{HCl}$ ; 1:3 v/v) หาปริมาณ Min-K โดยผลต่าง Total-K กับ  $\text{HNO}_3$ -K (Hosseini et al., 2010)

### การตรึงโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา

ชั่งดิน 30 กรัม เติมสารละลายโพแทสเซียมซึ่งเตรียมจาก  $\text{KNO}_3$  ที่มีโพแทสเซียม 15, 30, 45, 60, 75, 150, 300 และ 600  $\text{mg L}^{-1}$  ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้โพแทสเซียมที่เติมในดิน 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200 และ 500  $\text{mg kg}^{-1}$  หลังจากนั้นนำดินไปบ่มและอบที่ 40-45 °C จนดินแห้ง แล้วทำให้ดินชื้นโดยเติม DI water เขย่า นำไปอบให้ดินแห้งอีก 2 ครั้ง นำดินมาสกัดโพแทสเซียมด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ประเมินค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานโพแทสเซียม (buffering coefficient for potassium;  $\text{BC}_K$ ) จากความชันของกราฟเส้นตรงระหว่างปริมาณโพแทสเซียมที่สกัดได้และโพแทสเซียมที่เติมในดิน (Sirichomchun, 2009) และร้อยละโพแทสเซียมที่ถูกตรึง =  $(K_{\text{ที่ถูกตรึง}} / (K_{\text{ที่เติม}})) \times 100$

### การปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา

นำดินที่บ่มด้วยโพแทสเซียม 20, 40, 100, 200 และ 500  $\text{mg kg}^{-1}$  มาสกัดโพแทสเซียมที่เวลาต่าง ๆ โดยชั่งดินใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติม 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  (ดิน:น้ำยาสกัด; 1:2 w/v) เขย่า 1 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลา ปั่นเหวี่ยง แล้วเทสารสกัดทิ้ง (เพื่อกำจัด Sol-K และ Exch-K ที่มีอยู่ในดิน) จากนั้นล้างตะกอนดิน โดยเติม DI water 10 มิลลิลิตร เขย่าด้วยมือ 1 นาที

ปั้นเหนียง เทสารดังกล่าวทิ้ง แล้วนำตะกอนดินมาเติม 1 M NH<sub>4</sub>OAc pH 7 และสกัดโพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาที่เวลา 2, 4, 8, 16, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง โดยในแต่ละครั้งของการสกัดที่เวลาต่าง ๆ เก็บสารสกัด NH<sub>4</sub>OAc ที่ได้เพื่อวัดความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยและล้างตะกอนดิน เมื่อครบ 96 ชั่วโมง ประเมินปริมาณโพแทสเซียมปลดปล่อยสะสมจากผลรวมของโพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยจากชั่วโมงที่ 2-96

$$\text{โพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยจากโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (\%)} = \frac{\text{โพแทสเซียมที่ปลดปล่อยที่ 2 - 96 ชั่วโมง}}{\text{โพแทสเซียมทั้งหมดในดิน}} \times 100$$

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลสมบัติดินและรูปโพแทสเซียมมาวิเคราะห์ค่าต่ำสุด-สูงสุดของข้อมูล และหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มเนื้อดิน จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างร้อยละการตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินระหว่างกลุ่มเนื้อดินด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่  $P \leq 0.05$

### ผลการทดลอง

สมบัติดินและชนิดแร่ในอนุภาคดินเหนียวของดินปลูกยางพารา ดินปลูกยางพาราทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินมีพีเอชเป็นกรดรุนแรงถึงกรดเล็กน้อย (5.15-6.54) และค่าการนำไฟฟ้าต่ำ (0.01-0.02 dS m<sup>-1</sup>) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และไนโตรเจนทั้งหมดใกล้เคียงกัน (Table 4.2) แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียมที่สกัดได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณอนุภาคดินเหนียวที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและอินทรีย์วัตถุในดิน ที่พบว่ามีค่าสูงในดินเนื้อละเอียด ปานกลาง และหยาบ ตามลำดับ ส่วนแร่ในอนุภาคขนาดดินเหนียวของดินทั้ง 3 กลุ่ม โดยเฉพาะในดินเนื้อหยาบ และปานกลางส่วนใหญ่มีแร่เคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 60 (Table 4.1) พบอิลไลต์และมอนต์มอริลโลไนต์น้อยกว่าร้อยละ 10 ขณะที่กลุ่มดินเนื้อละเอียดมีแร่ดินเหนียวชนิดอิลไลต์และมอนต์มอริลโลไนต์ ตั้งแต่ร้อยละ 5-60



**Table 4.1** Mineralogy of clay fractions in studied soils.

Soil textural groups	Soil series	Soil texture	Kao	Ill	Ill-Mont	Ver	Gib	Ant	Qtz	etc
Coarse	Kh	Sandy loam	xxxx	xx	x	-	-	-	tr	-
	Bc*	Sand	-	-	-	-	-	-	-	-
	Km	Sandy loam	xxxx	-	x	-	-	-	tr	-
	Nat	Sandy loam	xxxx	-	x	-	-	-	tr	-
Medium	Fd	Sandy Clay Loam	xxxx	-	x	-	-	-	tr	-
	Bu	Loam	xxx	xx	-	-	-	-	x	-
	LI	Sandy Clay Loam	xxxx	x	-	-	-	-	-	x
	Hy	Sandy Clay Loam	xxxx	x	-	-	-	-	tr	-
Fine	Ak	Clay	xxx	-	-	-	xx	x	-	x
	Ntn	Clay Loam	xx	xx	xxx	-	-	-	-	-
	Ro	Clay Loam	xx	xx	xxx	-	-	-	-	-
	Ptl	Clay	xxxx	x	x	-	-	-	-	-

**Remark:** xxxx = > 60%; xxx = 40–60%; xx = 20–40%; x = 5–20%; and tr = <5%. Kao = kaolin; Ill = illite; Ill-Mont = illite-montmorillonite; Ver = vermiculite; Gib = gibbsite; Ant = anatase; Qtz = quartz. Bc\* = not analyzed because soil texture contained clay particles less than 6%.

**Table 4.2** Range, mean, and standard deviation (SD) value of soil samples.

Soil properties	Value	Soil textural groups		
		Coarse (n=4)	Medium (n=4)	Fine (n=4)
pH ( 1:5; soil:DI water)	Min-Max	5.02-5.27	4.56-6.99	4.99-7.67
	Mean $\pm$ SD	5.15 $\pm$ 0.11	5.34 $\pm$ 1.14	6.54 $\pm$ 1.12
EC (1:5) (dS m <sup>-1</sup> )	Min-Max	0.007-0.014	0.01-0.03	0.01-0.03
	Mean $\pm$ SD	0.01 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01
OM (g kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	5.83-11.44	6.55-18.29	17.07-23.02
	Mean $\pm$ SD	8.61 $\pm$ 2.29	13.63 $\pm$ 5.16	21.11 $\pm$ 2.79
Avai. P (mg kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	3.51-4.83	0.29-7.51	0.17-11.34
	Mean $\pm$ SD	3.90 $\pm$ 0.63	3.48 $\pm$ 3.20	5.48 $\pm$ 5.71
Extr. K (mg kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	5.39-16.88	18.83-38.35	29.00-81.23
	Mean $\pm$ SD	12.44 $\pm$ 4.93	28.07 $\pm$ 9.80	59.30 $\pm$ 25.35
Extr. Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	8.65-11.87	7.57-24.68	26.81-766.44
	Mean $\pm$ SD	30.15 $\pm$ 39.65	15.25 $\pm$ 7.29	319.67 $\pm$ 318.30
Extr. Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	6.06-125.19	4.11-119.11	13.91-796.17
	Mean $\pm$ SD	38.96 $\pm$ 57.73	41.19 $\pm$ 52.61	265.20 $\pm$ 364.51
Total N (g kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	0.23-0.77	0.59-1.05	0.97-1.55
	Mean $\pm$ SD	0.53 $\pm$ 0.23	0.87 $\pm$ 0.21	1.27 $\pm$ 0.24
CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Min-Max	1.01-2.05	3.37-7.78	9.31-12.20
	Mean $\pm$ SD	1.60 $\pm$ 0.44	5.33 $\pm$ 1.90	10.75 $\pm$ 1.19
Sand (%)	Min-Max	69.92-91.00	39.02-56.77	4.12-32.49
	Mean $\pm$ SD	80.19 $\pm$ 8.72	50.66 $\pm$ 8.16	19.93 $\pm$ 13.62
Silt (%)	Min-Max	3.02-14.17	10.94-36.56	11.12-37.18
	Mean $\pm$ SD	8.25 $\pm$ 5.01	23.83 $\pm$ 10.68	28.45 $\pm$ 11.89
Clay (%)	Min-Max	5.98-15.91	22.50-32.29	34.89-75.80
	Mean $\pm$ SD	11.56 $\pm$ 4.18	25.52 $\pm$ 4.59	51.62 $\pm$ 19.37

### โพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินปลูกยางพารา

ดินปลูกยางพาราทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า ในกลุ่มดินเนื้อหยาบ โพแทสเซียมส่วนใหญ่อยู่ในรูป Min-K > Exch-K > Fixed-K > Sol-K ขณะที่กลุ่มดินเนื้อปานกลาง และละเอียด ส่วนใหญ่อยู่ในรูป Min-K > Fixed-K > Exch-K > Sol-K (Table 4.3) Sol-K และ Exch-K มีแนวโน้มปริมาณเพิ่มขึ้นจากกลุ่มดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียด ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 5.22 ถึง 21.40 mg kg<sup>-1</sup> และ 7.22 ถึง 37.89 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ เช่นเดียวกับ NH<sub>4</sub>OAc-K, Fixed-K และ Total-K ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นในกลุ่มดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียด ตามลำดับ

**Table 4.3** Potassium speciation in coarse medium and fine textural groups.

Soil texture	Value	K speciation (mg kg <sup>-1</sup> )						
		Sol-K	Exch-K	NH <sub>4</sub> OAc-K	Fixed-K	HNO <sub>3</sub> -K	Min-K	Total-K
Coarse (n=4)	Min-Max	1.24-7.56	4.15-9.23	5.39-16.88	2.67-10.88	8.85-24.72	674-5416	690-5425
	Mean±SD	5.22±2.79	7.22±2.18	12.44±4.93	5.63±3.70	18.07±7.10	2776±2339	2794±2336
Medium (n=4)	Min-Max	7.57-11.28	10.28-27.07	18.83-38.35	3.43-66.13	35.68-104.48	672-6530	694-6634
	Mean±SD	9.13±1.92	18.94±8.41	28.07±9.80	26.07±34.79	54.14±44.11	3463±2938	3517±2981
Fine (n=4)	Min-Max	1.77-67.48	13.75-64.97	29.00-81.23	1.70-404.33	82.93-452.09	428-14800	511-15252
	Mean±SD	21.40±31.26	37.89±22.28	59.30±25.35	143.79±178.03	203.08±169.37	8187±6012	8390±6156

### การตรึงโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา

ร้อยละโพแทสเซียมที่ถูกตรึงจากการเติมความเข้มข้นโพแทสเซียมที่ระดับต่าง ๆ พบว่า ไม่แตกต่างกันทั้งในดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียด (Table 4.4) อย่างไรก็ตาม ร้อยละการตรึงโพแทสเซียมจากดินที่เติมโพแทสเซียมความเข้มข้นต่ำ ๆ (10-50 mg K kg<sup>-1</sup>) พบว่า ดินเนื้อละเอียดมีร้อยละการตรึงโพแทสเซียมสูงกว่าดินเนื้อปานกลาง และดินเนื้อหยาบ ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมที่เติมสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการตรึงโพแทสเซียมในดินลดลง (Table 4.4)

ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานโพแทสเซียม (BC<sub>K</sub>) (Figure 1a) หากค่า BC<sub>K</sub> สูง (มีค่าใกล้เคียง 1) ดินมีความสามารถในการตรึงโพแทสเซียมต่ำ ส่งผลให้ดิน ณ ขณะนั้นดินมีปริมาณโพแทสเซียมในสารละลายดินและที่ถูกดูดซับอยู่มาก ดินกลุ่มเนื้อดินหยาบมีค่า BC<sub>K</sub> (0.805) สูงกว่ากลุ่มเนื้อดินปานกลาง (0.802) และกลุ่มเนื้อดินละเอียด (0.779) ทั้งนี้ดินปลูกยางพารากลุ่มดินเนื้อละเอียดมีความสามารถในการตรึงโพแทสเซียมได้สูง และเป็นดินที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดินได้ดีกว่าดินเนื้อปานกลาง และดินเนื้อหยาบ ตามลำดับ

**Table 4.4** Percentage of fixed K in various different added K concentration.

Soil textural groups	Average K fixed (%)							
	Added K (mg kg <sup>-1</sup> )							
	10	20	30	40	50	100	200	500
Coarse	76.75	92.98	106.61	97.89	97.80	27.22	48.48	25.20
Medium	87.62	98.75	106.64	100.77	107.69	33.52	58.52	22.48
Fine	114.03	99.01	113.36	108.18	114.27	31.69	47.00	22.16
F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	26.23	15.54	14.79	13.49	18.20	44.15	17.13	15.33

**Remark:** ns = not significantly different ( $p > 0.05$ ); C.V. = coefficient of variation

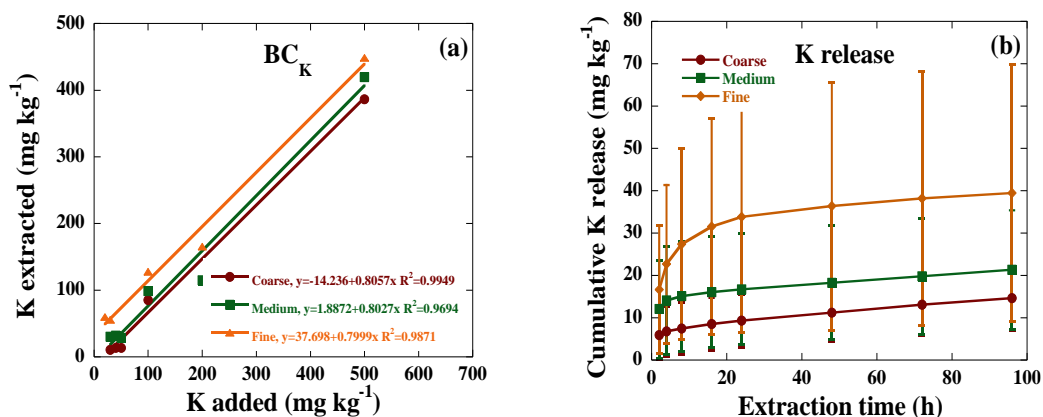


Figure 4.1 Buffer coefficient for K (a), and the average of cumulative K release in different soil textural groups (b).

#### การปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา

ดินเนื้อละเอียดมีการปลดปล่อยโพแทสเซียมสะสมสูงกว่าดินเนื้อปานกลาง และดินเนื้อหยาบ (Figure 4.1b) ปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาสูงขึ้นตามลำดับความเข้มข้นโพแทสเซียมที่เติม (Table 4.5) เมื่อประเมินปริมาณโพแทสเซียมที่ปลดปล่อยในดิน พบว่า ดินเนื้อละเอียดมีร้อยละโพแทสเซียมที่ถูกปลดปล่อยสูงสุดเมื่อเทียบกับดินเนื้อปานกลางและดินเนื้อหยาบ โดยดินเนื้อหยาบและปานกลางมีศักยภาพการปลดปล่อยโพแทสเซียมต่ำกว่าร้อยละ 2 ของปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน ในขณะที่ดินกลุ่มเนื้อละเอียดมีศักยภาพถึงร้อยละ 6 (Table 4.6)

Table 4.5 Cumulative K release in coarse medium and fine textural soil groups.

K added (mg K kg <sup>-1</sup> )	Cumulative K release (mg kg <sup>-1</sup> )			F-test	C.V. (%)
	Soil textural group				
	Coarse	Medium	Fine		
0	6.01b	7.30ab	14.85a	**	35.59
20	16.51	18.17	21.99	ns	22.87
40	8.48b	11.35b	20.59a	*	39.76
100	14.03b	19.05ab	33.87a	**	32.92
200	15.00b	25.18b	49.48a	**	26.09
500	27.76b	47.05b	96.21a	**	33.69

Remark: a-b Different letters within each row are significantly different, \* and \*\* are significant at the  $p \leq 0.05$  and  $0.01$  levels, ns is not significant at the  $p > 0.05$  level.

**Table 4.6** Percentage of K release from total K concentration.

K added (mg kg <sup>-1</sup> )	Percentage K release from Total K (%)				
	Textural soil groups			F-test	C.V. (%)
	Coarse	Medium	Fine		
0	0.41	0.18	0.84	ns	174.39
20	1.14	0.67	1.46	ns	144.41
40	0.54	0.37	1.42	ns	190.65
100	0.97	0.73	2.45	ns	233.60
200	1.11	0.83	3.28	ns	193.49
500	2.00	1.54	6.06	ns	194.60

**Remark:** ns letters is not significant at the  $p > 0.05$ .

## วิจารณ์ผลการทดลอง

### สมบัติดินปลูกยางพารา

ดินที่ปลูกยางพาราทั้ง 3 กลุ่มดินมีพีเอชเฉลี่ยเป็นกรดจัดถึงกรดเล็กน้อย (5.15-6.54) ยางพาราสามารถเจริญเติบโตเติบโตได้ในดินที่มีพีเอช 3.8–8.0 (Karthikakuttyamma *et al.*, 2000) สอดคล้องกับค่าพีเอชดินที่เหมาะสมในการปลูกยางพาราในประเทศไทยที่อยู่ในช่วง 4.5-5.5 (Rubber Research Institute, 2018) นอกจากนี้ ดินมีอินทรีย์วัตถุต่ำถึงปานกลาง (8.67–21.12 g kg<sup>-1</sup>) เพราะภาคใต้เป็นเขตร้อนชื้นทำให้เกิดการสลายตัวของซากพืชได้ดี สอดคล้องกับอินทรีย์วัตถุแปลงปลูกยางพาราในจังหวัดสงขลา (Poonpakdee *et al.*, 2013) และปัตตานี (Damrongrak *et al.*, 2015) ที่พบว่า อินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง การยกระดับอินทรีย์วัตถุในดินจำเป็นต้องเพิ่มการใช้วัสดุอินทรีย์หรือปุ๋ยอินทรีย์ มีรายงานว่าแปลงยางพาราที่มีการปลูกต้นตะเคียนและผักเหลียงร่วมมีอินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้นเนื่องจากการร่วงหล่นของใบและส่วนของพืช (Saeteaw *et al.*, 2020) ดินปลูกยางพาราที่ศึกษามีไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และแคลเซียมที่สกัดได้ต่ำในกลุ่มดินเนื้อหยาบและปานกลาง ในขณะที่เนื้อดินละเอียดอยู่ในระดับปานกลาง (Table 4.2) รวมถึงแมกนีเซียมที่สกัดได้ พบว่า ดินทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับระดับที่เหมาะสม (Kungpisdan, 2011) ดินปลูกยางพารามีการสูญเสียธาตุอาหารไปกับผลผลิต โดยในน้ำยางพารา 1 ตันมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบ 20, 5, 25, และ 5 กิโลกรัม ตามลำดับ (Kungpisdan, 2009; Rubber Research Institute, 2018) ดังนั้น จึงส่งผลให้ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำเช่นเดียวกับดินปลูกปาล์มน้ำมัน

(Sanputawong *et al.*, 2017) และดินปลูกไม้ผลต่าง ๆ (Ntlopo *et al.*, 2022) ในประเทศไทยที่พบว่ามีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

### การตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา

ดินปลูกยางพาราที่ศึกษาตรึงโพแทสเซียมได้ต่ำ เนื่องจากดินภาคใต้ส่วนใหญ่เป็นดินพัฒนาการสูงและถูกจัดอยู่ในอันดับ Ultisols ดินมีแร่เคลโอไลต์ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่มีกิจกรรมต่ำเป็นแร่องค์ประกอบหลัก (Table 4.1) อย่างไรก็ตาม ร้อยละการตรึงโพแทสเซียมของดินที่เติมความเข้มข้นโพแทสเซียมที่ระดับต่ำ ๆ ( $10-50 \text{ mg K kg}^{-1}$ ) มีค่าสูงกว่าเมื่อเติมความเข้มข้นสูง (Table 4.4) ในดินเนื้อละเอียดมีร้อยละการตรึงสูงกว่าในกลุ่มดินเนื้อปานกลาง และหยาบ ตามลำดับ เนื่องจากในกลุ่มดินเนื้อละเอียดมีร้อยละของแร่ฮิลไลต์และแร่ผสมระหว่างฮิลไลต์และมอนมอริลโลไนต์สูงกว่าในกลุ่มดินเนื้อปานกลางและหยาบ แร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เช่น เวอร์มิคิวไลต์ ( $-200$  ถึง  $-100 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) มอนต์มอริลโลไนต์ ( $-150$  ถึง  $-80 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) มีประจุไฟฟ้าลบสุทธิสูงกว่าเคลโอไลต์ ( $-15$  ถึง  $-1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) แร่ดินเหนียวชนิด 2:1 ยังมีความสามารถในการยึดดูดตัวสูงกว่า จึงทำให้เกิดการตรึงโพแทสเซียมระหว่างช่องว่างของแร่ดินเหนียวได้ดีกว่าแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นโพแทสเซียมที่ระดับ 100, 200 และ  $500 \text{ mg K kg}^{-1}$  พบว่า ดินมีร้อยละการตรึงโพแทสเซียมลดลง ทั้งนี้ ดินที่ศึกษามีแร่ดินเหนียวเคลโอไลต์ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำกัดจึงทำให้มีการดูดซับโพแทสเซียมได้จำกัด ดังนั้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโพแทสเซียมที่เติมในดิน จึงส่งผลให้ร้อยละการดูดซับโพแทสเซียมได้ลดลง (Table 4.4) ดินเนื้อละเอียดมีอนุภาคดินเหนียวและปริมาณอินทรีย์วัตถุซึ่งเป็นแหล่งประจุลบในดินสูงกว่ากลุ่มดินเนื้อปานกลางและหยาบ ส่งผลให้ดินเนื้อละเอียดมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูง (Table 4.2) สอดคล้องกับดินเนื้อปูนที่มีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนและปริมาณร้อยละดินเหนียวสูงพบว่าตรึงโพแทสเซียมได้ดี (Najafi and Abtahi, 2012) ค่า  $BC_k$  ของดินเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงความสามารถของดินในการตรึงโพแทสเซียมในดิน โดยค่าดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับปริมาณประจุไฟฟ้าลบระหว่างชั้นของแร่ดินเหนียว (inter layer) (Wivutvongvana, 2003) นอกจากนี้ การแห้งสลับเปียกของดินยังส่งเสริมให้เกิดการตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมมากขึ้น (Shakeri and Abtahi, 2019)

ดินเนื้อละเอียดมีความสามารถในการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมได้ดีกว่าดินเนื้อปานกลางและดินเนื้อหยาบ (Table 4.7) ดินเนื้อละเอียดมีแร่ดินเหนียว 2:1 เช่น แร่ฮิลไลต์ ( $100-200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) มอนต์มอริลโลไนต์ ( $700-800 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงกว่าแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 เช่น เคลโอไลต์ ( $10-20 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) (Wivutvongvana, 2003) ซึ่งพบมากในดินเนื้อปานกลางและเนื้อหยาบ (Table 4.1) จึงส่งผลให้ดินเนื้อละเอียดมีสมบัติในการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมได้ดีกว่าดินเนื้อหยาบ ดังนั้น โดยทั่วไปค่าแนะนำปุ๋ยในดินเนื้อหยาบจึงมีปริมาณโพแทสเซียมสูงกว่าในดินเนื้อละเอียด เช่นเดียวกับ

คำแนะนำปุ๋ยสำหรับยางพาราก่อนเปิดกรีดที่ปลูกในดินเนื้อหยาบ (20-10-17) ซึ่งมีโพแทสเซียมสูงกว่าดินเนื้อละเอียด (20-10-12) ในเขตปลูกยางใหม่ของประเทศไทย (Rubber Research Institute, 2018) ดินที่มีแร่ดินเหนียวซิลิเกตและมอนโมลิโลไนต์สูงมีความสามารถในการปลดปล่อยโพแทสเซียมสูงกว่าดินที่มีแร่เคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก (Darunsontaya *et al.*, 2010) ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าศักยภาพความจุบัพเฟอร์ของโพแทสเซียม (potential buffering capacity of K;  $PBC_k$ ) ซึ่งเป็นดัชนีบ่งบอกความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน หากค่า  $PBC_k$  สูง แสดงว่าดินสามารถรักษาระดับปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินได้ดี (Saleque *et al.*, 2009) พบว่า ค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณอินทรีย์วัตถุและค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน (Suttanukool *et al.*, 2019) นอกจากนี้ ความสามารถของดินในการเป็นแหล่งให้โพแทสเซียมแก่พืชดาซีโอ (*Pistacia vera* L.) ที่ปลูกในดินที่ไม่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม พบว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดี แต่โพแทสเซียมที่ถูกตรึงในดินบริเวณโคนรากพืชมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง เนื่องจากดินปลดปล่อยโพแทสเซียมจากรูปที่ถูกตรึงซึ่งไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันทีให้ออกมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์และพืชสามารถดูดนำไปใช้ได้ (Hosseinifard *et al.*, 2010)

มีการใช้แร่ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบมาบดให้มีขนาดเล็กเพื่อใช้เป็นแหล่งให้โพแทสเซียมแก่หญ้าไรซ์ที่ปลูกในดินที่มีโพแทสเซียมต่ำ พบว่า หญ้าไรซ์ (*Lolium perenne* L.) สามารถเจริญเติบโตและมีการดูดใช้โพแทสเซียมสูงกว่าการไม่ใส่แร่ดังกล่าว (Li *et al.*, 2015) เช่นเดียวกับการใช้แร่ไบโอไทต์ โพลโกไทต์ และไมโครคลายน์เป็นแหล่งให้โพแทสเซียมแก่พืช พบว่า ต้นหอมมีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และการเจริญเติบโตดีขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ใส่ อีกทั้งไม่ได้ส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นหอมมีความแตกต่างเมื่อเทียบกับการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (Manning *et al.*, 2017; Mohammed *et al.*, 2014) ดังนั้นการใช้แร่โพแทสเซียมจึงเป็นแหล่งโพแทสเซียมให้แก่พืชได้ แม้ว่าดินมีความสามารถในการรักษาระดับโพแทสเซียม แต่การปลูกพืชในดินที่มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินสูง พบว่า ดินมีโพแทสเซียมทั้งหมดลดลงและเกิดการเสียสมดุลโพแทสเซียมมากกว่าดินที่ปลูกพืชและมีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียม (Li *et al.*, 2020) ดังนั้น ดินที่ใช้ทำการเกษตรจึงควรใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมให้เพียงพอต่อความต้องการของพืชเพื่อรักษาสมดุลโพแทสเซียมในดิน

**Table 4.7** Average the amount of fixed potassium and released potassium in various K added in soils.

Soil textural group	K average (mg kg <sup>-1</sup> )	
	K fixed	Cumulative release K
Coarse	61.58	16.36 b
Medium	64.60	24.16 b
Fine	65.40	44.88 a
F-test	ns	**
C.V. (%)	67.09	71.68

**Remark:** a-b different script letters within each column are significantly different, \*\* is significant at the  $p \leq 0.01$  level, ns is not significant at the  $p > 0.05$  level.

### แนวทางการจัดการโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย

ดินปลูกยางพาราทั้ง 3 เนื้อดินมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (Table 4.3) ต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม (40–80 mg kg<sup>-1</sup>) (Rubber Research Institute, 2018) สอดคล้องกับการศึกษาความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ที่พบว่าอยู่ในระดับต่ำ (Damrongrak *et al.*, 2015; Kongmak *et al.*, 2017) ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีโพแทสเซียมที่ถูกตรึงซึ่งเป็นแหล่งสำรองโพแทสเซียมต่ำ ทั้งนี้ภาคใต้เป็นเขตปลูกยางพาราเดิมมีการปลูกยางพาราเป็นรอบที่ 2-3 ดังนั้นการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมให้เพียงพอต่อความต้องการของยางพาราจึงเป็นสิ่งจำเป็นโดยเฉพาะภายหลังเปิดกรีดที่ยางพาราจำเป็นต้องนำโพแทสเซียมไปใช้ในการสร้างน้ำยาง สถาบันวิจัยยางได้แนะนำปุ๋ยผสมสูตร 29-5-18 อัตรา 1 kg tree<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> คิดเป็นโพแทสเซียมที่ใส่ในดิน 11.35 kg rai<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (76 tree rai<sup>-1</sup>) และยางพารามีการดูดใช้โพแทสเซียมสร้างมวลและน้ำยาง 7.23 kg rai<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (ข้อมูลจากสวนยางพาราที่ให้ผลผลิตเนื้อยางแห้ง 400 kg rai<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> ต้นยางพารามีการใช้โพแทสเซียมในการสร้างมวลและน้ำยาง 95.2 g tree<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) (Yingjajaval and Bangjan, 2006) เห็นได้ว่าโพแทสเซียมที่ใส่และที่สูญเสียไปกับน้ำยางมีปริมาณใกล้เคียงกัน ความสามารถในการตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียดมีแตกต่างกัน นอกจากนั้นปุ๋ยโพแทสเซียมเมื่อใส่ลงไปดินมีประสิทธิภาพให้พืชดูดนำไปใช้ได้เพียงร้อยละ 20-40 (Baligar and Bennett, 1986) ดังนั้น การแบ่งใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในปริมาณน้อยแต่บ่อยครั้ง ร่วมกับการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ จึงเป็นแนวทางเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินและการปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของดินโดยเฉพาะในดินเนื้อหยาบ ซึ่งมีความสามารถในการตรึงโพแทสเซียมได้ต่ำ (Figure 4.1a) ทั้งนี้สถาบันวิจัยยางแนะนำปุ๋ยอินทรีย์ในอัตรา 3-5 กิโลกรัมต่อต้นต่อปี (Rubber Research Institute, 2018)



โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป Min-K มากกว่าร้อยละ 95 ของโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Table 3) โพแทสเซียมในรูปนี้เป็นแหล่งสำรองโพแทสเซียมแก่ยางพาราในอนาคต มีรายงานว่ายางพารามีกลไกในการหลังกรดออกซาลิก (oxalic acid) ให้ออกมาบริเวณราก (Onthong and Osaki, 2006) นอกจากนั้น แบคทีเรียที่สามารถละลายแร่ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบ (K solubilizing bacteria; KSB) ก็สามารถสร้างและปลดปล่อยกรดออกซาลิก ซิทริก (citric acid) และมาลิก (malic acid) (Chen *et al.*, 2022) ให้ออกมาในดินได้เช่นเดียวกัน กรดอินทรีย์ดังกล่าวจะไปละลายโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่เป็นองค์ประกอบของแร่ซึ่งพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ให้ออกมาและกลายเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ ดังนั้น การประยุกต์ใช้แบคทีเรียกลุ่ม KSB ซึ่งสามารถสร้างกรดอินทรีย์รวมทั้งการกระตุ้นให้ยางพาราสามารถหลังกรดอินทรีย์ดังกล่าวออกมาจะส่งผลให้โพแทสเซียมบริเวณรากพืชเป็นประโยชน์มากขึ้น ดังนั้น หากสามารถละลายโพแทสเซียมจากรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันทีให้เป็นประโยชน์ร่วมกับการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมและปุ๋ยอินทรีย์ในดินปลูกยางพารา จึงน่าจะเป็นแนวทางในการจัดการโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยเฉพาะในช่วงที่ปุ๋ยโพแทสเซียมมีราคาแพงในสภาวะปัจจุบัน

### สรุปและข้อเสนอแนะ

โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที ในขณะที่โพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลางและมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากดินในกลุ่มดินหยาบ ปานกลาง และเนื้อละเอียด ตามลำดับ การตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา พบว่า การตรึงโพแทสเซียมในดินเกิดได้ดีในกลุ่มเนื้อดินละเอียดซึ่งมีแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เต็ม ดินปลูกยางพาราในภาคใต้ทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินมีค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานโพแทสเซียม ( $BC_K$ ) สูงอยู่ในช่วง 0.8 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปดิน โพแทสเซียมส่วนใหญ่ร้อยละ 80 อยู่ในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ในขณะที่ร้อยละ 20 ของปริมาณที่เติมลงไปถูกตรึงไว้ในดิน ในขณะที่ความสามารถในการปลดปล่อยโพแทสเซียมพบว่า โพแทสเซียมมีการปลดปล่อยได้ดีในกลุ่มดินเนื้อละเอียดสูงกว่าดินเนื้อปานกลาง และหยาบตามลำดับ ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีศักยภาพในการปลดปล่อยโพแทสเซียมจากโพแทสเซียมที่เป็นแหล่งสำรองได้ต่ำ ดังนั้น ดินปลูกยางพาราในภาคใต้จึงควรใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมและปุ๋ยอินทรีย์ร่วมด้วยเพื่อเป็นแหล่งให้โพแทสเซียม นอกจากนั้น ควรมีการประยุกต์ใช้แบคทีเรีย ที่เปลี่ยนโพแทสเซียมจากรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชให้พืชสามารถดูดนำไปใช้ได้ร่วมกับการวิจัยเพิ่มเติมถึงแนวทางในการกระตุ้นให้ยางพาราสามารถหลังกรดอินทรีย์เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์โพแทสเซียมในดิน

## บทที่ 5

### สมดุลโพแทสเซียมและการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินปลูกกล้วย ยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย

#### บทนำ

การจัดการโพแทสเซียม (K) ในดินปลูกยางพาราให้มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของยางพารามีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตของยางพารา สถาบันวิจัยยางแนะนำปุ๋ยผสมสูตร 20-8-20 สำหรับยางพาราก่อนเปิดกรีดที่ปลูกในภาคใต้ โดยอัตราที่ใช้ขึ้นอยู่กับอายุยางพารา (Rubber Research Institute, 2018) ดินในภาคใต้ส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ พีเอชต่ำ อินทรีย์วัตถุต่ำ ดินมีการสะสมสารประกอบของเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ (Kitprasong *et al.*, 2020; Poonpakdee *et al.*, 2013) ดินส่วนใหญ่มีแร่ดินเหนียวชนิดเคโอลิไนต์ซึ่งเป็นแร่ที่มีความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ต่ำ ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร ที่เป็นแคตไอออนต่ำ และโดยสภาพภูมิอากาศของภาคใต้ที่ร้อนชื้น ฝนตกชุก ดินจึงสูญเสียโพแทสเซียมซึ่งเป็นธาตุที่ยางพาราต้องการมากออกไปจากดินได้ง่ายโดยกระบวนการชะละลาย ส่งผลให้ดินปลูกยางพาราในภาคใต้ส่วนใหญ่มีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำ (Poonpakdee *et al.*, 2013; Damrongrak *et al.*, 2015) นอกจากนี้ ดินปลูกยางพารายังมีการสูญเสียโพแทสเซียมโดยติดไปกับผลผลิต โดยในน้ำยางพารา 1 ตันมีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบถึง 25 กิโลกรัม (Kungpisdan, 2009; Rubber Research Institute, 2018)

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคใต้ที่มีพื้นที่ปลูก 14.63 ล้านไร่ (Office of Agricultural Economics, 2020) ยางพาราจะเจริญเติบโตดีและให้ผลผลิตสูงจำเป็นต้องได้รับโพแทสเซียมอย่างเพียงพอ โพแทสเซียมมีบทบาทในการช่วยในการควบคุมการเปิดปิดของปากใบ กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ช่วยในการเคลื่อนย้ายแป้งและน้ำตาลในเซลล์พืช (Joseph *et al.*, 1998) และควบคุมศักย์ออสโมซิสซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปิดปิดของปากใบ (Osotsapa, 2015) เมื่อยางพาราได้รับโพแทสเซียมเพียงพอ พบว่า ยางพาราก่อนเปิดกรีดโตดีขึ้น ส่วนยางพาราหลังเปิดกรีดสร้างเปลือกใหม่เร็วขึ้นและปริมาณน้ำยางเพิ่มขึ้น (Kungpisdan, 2009) มีการศึกษาการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมในกล้วยอายุ 8 เดือน พบว่า อัตราโพแทสเซียมที่ใส่มีผลต่อความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และจำนวนใบเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออัตรา  $K_2O$  สูงกว่า  $0.25 \text{ kg. m}^{-3}$  มีรายงานว่า ส่งผลให้การเจริญเติบโตของกล้วยพาราลดลง (Correia *et al.*, 2017) ในทางกลับกัน หากยางพาราได้รับ

โพแทสเซียมไม่เพียงพอจะแสดงอาการใบเหลืองซีดทั่วทั้งใบ เริ่มจากขอบใบและยอด หากรุนแรงจะเห็นสีเหลืองซีดทั่วทั้งต้น (Kungpisdan, 2007)

การประเมินสมมูลธาตุโพแทสเซียมในดินเป็นการประเมินผลต่างระหว่างปริมาณโพแทสเซียมที่มีการสูญเสียออกจากดิน เช่น ติดไปกับผลผลิตหรือกระบวนการอื่น ๆ กับปริมาณโพแทสเซียมที่ใส่ในดิน (Balik, 2019) ซึ่งการประเมินสมมูลธาตุโพแทสเซียมในดินสามารถใช้งบชี้ถึงการเพิ่มหรือลดของระดับธาตุอาหารที่มีอยู่ในดิน (Oenema *et al.*, 2003) เมื่อการสูญเสียธาตุโพแทสเซียมออกจากดินมากกว่าการได้รับโพแทสเซียมในรูปของปุ๋ย ส่งผลให้ดินเกิดสภาวะไม่สมดุลของรูปโพแทสเซียมในดิน แม้ว่าดินจะมีสมบัติในการต้านทานการเปลี่ยนระดับโพแทสเซียมในดินโดยการเปลี่ยนรูปโพแทสเซียมจากรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที (โพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่ถูกตรึง และโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่) ให้กลายเป็นอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ให้พืชสามารถนำไปใช้ได้ (โพแทสเซียมในสารละลายดิน และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้) (Brady and Weil, 2008) อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดินมีปริมาณลดลงและเกิดการเสียสมดุลโพแทสเซียมในดิน

การประเมินรูปโพแทสเซียมในดินสามารถประเมินได้ 2 แบบ คือ การประเมินโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินที่แบ่งรูปโพแทสเซียมในดินตามความเป็นประโยชน์ต่อพืช (single leaching extraction; SLE) และการสกัดแบบลำดับขั้น (sequential extraction process; SEP) ซึ่งเป็นการประเมินรูปของโพแทสเซียมในดินที่มีสภาพแวดล้อมเป็นอิทธิพลที่ส่งผลต่อการละลาย การตกตะกอน และความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดิน มีรายงานว่ารูปของโพแทสเซียมในดินที่สกัดได้จาก 2 วิธี มีความสัมพันธ์กัน (Figure 3.7) ปัจจุบันวิธีการสกัดธาตุอาหารพืชในดินแบบลำดับขั้นนี้ได้รับการยอมรับและถูกใช้เพื่อประเมินความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชในดิน เช่น แมกนีเซียม (Ntlopo *et al.*, 2022) สังกะสี (Ge *et al.*, 2022) โพแทสเซียม (Poonpakdee *et al.*, 2018) เหล็ก (Chen *et al.*, 2019) และฟอสฟอรัส (Bai *et al.*, 2023) ตลอดจนศึกษาการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนแปลงรูปของธาตุต่าง ๆ ในดิน เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปแมกนีเซียมในดินปลูกข้าวโพด (Kitprasong, 2020) อย่างไรก็ตาม การศึกษาสมมูลโพแทสเซียมและการเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียมในดินประเทศไทยมีรายงานอยู่น้อยมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียมในดินตลอดจนประเมินสมมูลโพแทสเซียมในดินปลูกกล้วยพาราเพื่อเป็นแนวทางการจัดการความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินปลูกกล้วยพารา

## อุปกรณ์และวิธีการ

นำตัวอย่างดินทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินที่ใช้ในการทดลองที่ 1 อันได้แก่ ดินเนื้อหยาบ ดินเนื้อปานกลาง และดินเนื้อละเอียด อย่างละ 1 ชุดดินมาปลูกกล้วยพารา โดยประเมินปริมาณการใช้โพแทสเซียมในกล้วยพารา และศึกษาสมมูลโพแทสเซียม ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียมในดินที่ไม่ใส่ปุ๋ยและใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการสะสมของโพแทสเซียมส่วนต่าง ๆ ในพืช

### การเก็บและเตรียมตัวอย่างดิน

ใช้ดิน 3 กลุ่มเนื้อดิน คือ กลุ่มดินเนื้อหยาบ (ชุดดินคอหงษ์ (Kh); Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiodults) กลุ่มดินเนื้อปานกลาง (ชุดดินลำภูรา (LL); Fine, mixed, semiactive, isohyperthermic Typic Palehumults) และกลุ่มดินเนื้อละเอียด (ชุดดินนาทอน (Ntn); Fine, mixed, semiactive, isohyperthermic Typic Haplohumults) ที่เก็บที่ระดับความลึก 0 – 30 cm นำมาผึ่งให้แห้ง หลังจากนั้น ร้อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 และ 0.5 mm เพื่อใช้วิเคราะห์สมบัติทางเคมี และร่อนดินผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 cm เพื่อใช้สำหรับปลูกกล้วยพาราในกระถาง

### สมบัติดินทางเคมีและรูปของโพแทสเซียมในดิน

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน ได้แก่ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า (ดิน:น้ำ = 1:5 w/v) อินทรีย์วัตถุ (Walkley and Black) ไนโตรเจนทั้งหมด (Kjeldahl) และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray II) ส่วนแคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียมที่สกัดได้ และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน ทำได้โดยนำดินมาสกัดด้วย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  pH 7.0 และวัดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) โดยแคลเซียมและแมกนีเซียมใช้หลักการของ atomic absorption ส่วนโพแทสเซียมใช้หลักการของ atomic emission (Onthong and Poonpakdee, 2020) และเนื้อดินโดยวิธี Hydrometer (Gee and Bauder, 1986)

นอกจากนั้น วิเคราะห์รูปของโพแทสเซียมในดินก่อนและหลังปลูกพืช โดยสกัดโพแทสเซียมแบบลำดับขั้น นำดินที่ร่อนผ่านตะแกรง 2 mm ใส่ในหลอดหมุนเหวี่ยงพลาสติกขนาด 50 mL จากนั้นนำมาเติมสารสกัดต่าง ๆ ตามการสกัดโพแทสเซียมตามลำดับขั้น (Table 3.3) (Tessier et al., 1979) นำสารสกัดมาแยกสารละลายกับอนุภาคดินโดยปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,500 rpm นาน 10 นาที จากนั้นใช้หลอดหยดดูดสารละลายส่วนใส เพื่อป้องกันการสูญเสียของตะกอนดิน และเก็บสารละลายส่วนใสไปวัดโพแทสเซียมด้วยเครื่อง AAS และนำตะกอนที่เหลือมาล้างโดยใช้น้ำปราศจากไอออน และนำไปหมุนเหวี่ยงเช่นเดิม ใช้หลอดหยดดูดสารละลายส่วนใสทิ้ง และนำตะกอนที่เหลือมาสกัดในรูป

ถัดไป สำหรับการวิเคราะห์โพแทสเซียมที่เป็นรูปตะกอนตกค้าง (residual) นำตะกอนดินที่ได้จากการสกัดย่อย มาย่อยด้วยกรด  $\text{HClO}_4$  : HF ในสัดส่วน 1:5 v/v นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ ประมาณ 113 °C จนกระทั่งดินมีสีขาว จากนั้นนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS หลังจากนั้น คำนวณโพแทสเซียมทั้งหมดในดิน (Total-K) โดยได้จากผลรวมความเข้มข้นของโพแทสเซียมรูปแบบต่าง ๆ ในดิน

### การปลูกและดูแลรักษากล้วยพาราในกระถาง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) มี 4 ทรีตเมนต์ ๆ ละ 6 ซ้ำ โดยนำดิน 7 kg บรรจุลงในกระถางขนาด 10 L ใช้ต้นกล้วยที่มีการติดตาพันธุ์ RRIM 600 ปลูกลงในดินทั้ง 3 เนื้อดิน เมื่อต้นกล้าอายุ 1 เดือน ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ให้ได้ปริมาณ Total N และ  $\text{P}_2\text{O}_5$  ในอัตรา 3.35 g pot<sup>-1</sup> และ 1.08 g pot<sup>-1</sup> ตามลำดับ ส่วนโพแทสเซียมใส่ตามคำแนะนำการใช้ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์โพแทสเซียมที่สกัดได้ในดิน (สกัดโดย 1 M  $\text{NH}_4\text{OAc}$  พีเอช 7.0) โดยพบว่า โพแทสเซียมที่สกัดได้ในดินเนื้อหยาบอยู่ในระดับต่ำ (13.84 mg kg<sup>-1</sup>) ส่วนดินเนื้อปานกลางและดินเนื้อละเอียดอยู่ในระดับปานกลาง (44.14 และ 79.19 mg kg<sup>-1</sup> ตามลำดับ) หลังจากนั้น ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา 0, 0.5, 1, และ 2 เท่า ของอัตราแนะนำตามค่าวิเคราะห์ดินในพื้นที่ 1 ไร่ (ยางพารา 76 ตัน/ไร่) ของสถาบันวิจัยยาง (Suchartgul, 2021) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมอัตราดังกล่าวทุก 1-2 สัปดาห์ โดยเริ่มใส่เมื่อยางพารามีอายุหลังย้ายกล้า 1 เดือน จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง (6 เดือน) เมื่อรวมปริมาณโพแทสเซียมใส่ในรูปปุ๋ยพบว่า ให้โพแทสเซียมแก่ดินในรูปของปุ๋ยเท่ากับ 0, 200, 400 และ 800 mg K kg<sup>-1</sup> ในดินเนื้อดินหยาบ และ 0, 160, 320, และ 640 mg kg<sup>-1</sup> ในเนื้อดินปานกลางและเนื้อดินละเอียด ทุกสัปดาห์ทำการรดปุ๋ยสารละลายไฮโดรพอนิกส์ A และ B ที่ไม่มีธาตุโพแทสเซียม (Table 5.1) เพื่อให้ดินมีธาตุอื่น ๆ เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของกล้วยพารา

Table 5.1 Mixture of fertilizer solution A and B.

Nutrient solution	Fertilizers/Chemicals	Weight (g/10 liters)
A	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,797
	Fe-EDTA (13% Fe <sup>3+</sup> )	40
	Fe-EDDHA (6 % Fe <sup>2+</sup> )	40
B	(NH <sub>4</sub> )H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	300
	Mg(SO <sub>4</sub> )·7H <sub>2</sub> O	495
	MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	7.5
	CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.51
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub>	0.17
	ZnSO <sub>4</sub>	2.38
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	6.23

**Remark:** The solution A and B must be diluted 10 times before using, 30 mL of diluted solution was used for watering every week.

### การประเมินการเจริญเติบโตและธาตุอาหารที่ยางพาราดูดนำไปใช้

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตการเจริญเติบโตของกล้ายางทุก ๆ 1 เดือน ได้แก่ 1) ความสูง (เซนติเมตร) โดยการวัดระดับความสูงจากผิวดินจนถึงส่วนยอดด้วยตลับเมตร 2) เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (มิลลิเมตร) โดยวัดส่วนของลำต้นที่สูงจากผิวดินประมาณ 3 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องเวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล ทำการประเมินการเจริญเติบโตของกล้ายางพาราที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ เดือนเทียบกับก่อนย้ายลงปลูก เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำตัวอย่างพืชมาชั่งน้ำหนักสดโดยตัดส่วนต่าง ๆ ของกล้ายางพารา แยกเป็น ใบ กิ่ง-ลำต้น และราก และอบที่อุณหภูมิ 75 °C นาน 2-3 วัน เพื่อประเมินน้ำหนักแห้ง นำส่วนต่าง ๆ บดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืชผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh เพื่อย่อยและวิเคราะห์ธาตุอาหารในพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ทั้งหมด (Onthong and Poonpakdee, 2020) ที่อยู่ในส่วนของลำต้น-กิ่ง ใบ และราก หลังจากนั้นประเมินปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดนำไปใช้ (uptake) ในแต่ละส่วนของต้นกล้ายางพารา โดยคำนวณจากน้ำหนักแห้งและความเข้มข้นในส่วนต่าง ๆ (Fageria, 1992) รวมทั้งประเมินร้อยละการสะสมโพแทสเซียมในส่วนต่าง ๆ ของกล้ายางพาราเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่แตกต่างกัน

### สมมูลโพแทสเซียมในดินและที่พืชดูดนำไปใช้

ประเมินการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดิน และสมมูลโพแทสเซียมที่กล้วยา พาราดูดนำไปใช้กับปริมาณโพแทสเซียมที่เติมลงไป ในดินโดย (Balik, 2019)

$$\text{สมมูลโพแทสเซียมในดิน} = (\text{โพแทสเซียมที่เติม} + \text{โพแทสเซียมในดิน}) - \text{โพแทสเซียมที่พืชดูดใช้}$$

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบการเจริญเติบโต และปริมาณการดูดใช้ธาตุอาหารของกล้วยา พาราที่ปลูกใน แต่ละเนื้อดินโดยการเปรียบเทียบความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ตลอดจนเปรียบเทียบรูปของโพแทสเซียมในดินในแต่ละเนื้อดินก่อน และหลังการทดลอง

### ผลการทดลอง

#### สมบัติดินทางเคมีและรูปของโพแทสเซียมในดินปลูกกล้วยา พาราเนื้อดินต่าง ๆ

ดินเนื้อหยาบที่ใช้ปลูกกล้วยา พารามีพีเอชต่ำกว่าดินเนื้อปานกลาง และดินเนื้อละเอียด ดิน ทั้ง 3 เนื้อดินมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ ( $0.01 \text{ dS m}^{-1}$ ) (Table 5.2) ดินที่ใช้ปลูกกล้วยา พาราทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดิน โดยภาพรวมส่วนใหญ่มีสมบัติทางเคมีต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมสำหรับกล้วยา พารา โดยเฉพาะในดินเนื้อ หยาบมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โพแทสเซียมที่สกัดได้ แคลเซียม แมกนีเซียมที่สกัดได้ อินทรีย์วัตถุ ในดิน และค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในระดับต่ำกว่าในดินเนื้อปานกลางและดินเนื้อหยาบ ตามลำดับ ส่วนรูปโพแทสเซียมในดิน พบว่า โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป Res-K > Exch-K > Oxide-K > OM-K > Car-K ทั้งนี้ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดในดินมีค่าสูงในดินเนื้อละเอียด ปาน กลาง และหยาบ ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า ความเข้มข้นของ Exch-K, Car-K และ Oxide-K มี ปริมาณเพิ่มขึ้นจากดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียด ตามลำดับ (Table 5.3)

**Table 5.2** Soil chemical properties of coarse, medium, and fine textural groups.

Soil property	Soil textural group			Optimal value*
	Coarse (Kh)	Medium (Ll)	Fine (Ntn)	
pH (1:5)	5.12	5.21	7.67	4.5-5.5
EC (dS m <sup>-1</sup> )	0.01	0.01	0.01	-
OM (g kg <sup>-1</sup> )	8.41	18.29	22.93	10-25
Avai.P (mg kg <sup>-1</sup> )	3.53	4.47	11.34	11-30
Extr. K (mg kg <sup>-1</sup> )	13.84	44.14	79.19	40-80
Extr. Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	11.87	16.63	766.44	50-600
Extr. Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	6.87	119.11	210.23	>36
Total N (g kg <sup>-1</sup> )	0.23	1.05	1.55	1.1-2.5
CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	1.54	4.41	10.91	-
Sand (%)	78.28	55.85	32.49	-
Silt (%)	10.43	21.30	30.42	-
Clay (%)	11.29	22.86	37.09	-
Soil texture	Sandy loam	Sandy clay loam	Clay loam	-

**Remark:** \*Optimal value for rubber growing soils based on Rubber Research Institute (2018)

**Table 5.3** K speciation in soils before rubber budding cultivation.

Soil textural group	K speciation (mg kg <sup>-1</sup> )					
	Exch-K	Car-K	Oxide-K	OM-K	Res-K	Total-K
Coarse (Kh)	4.70	0.61	1.66	0.88	4058.88	4066.73
Medium (Ll)	8.77	0.54	6.05	4.26	10342.86	10362.48
Fine (Ntn)	12.34	3.75	7.88	3.07	11651.43	11678.47

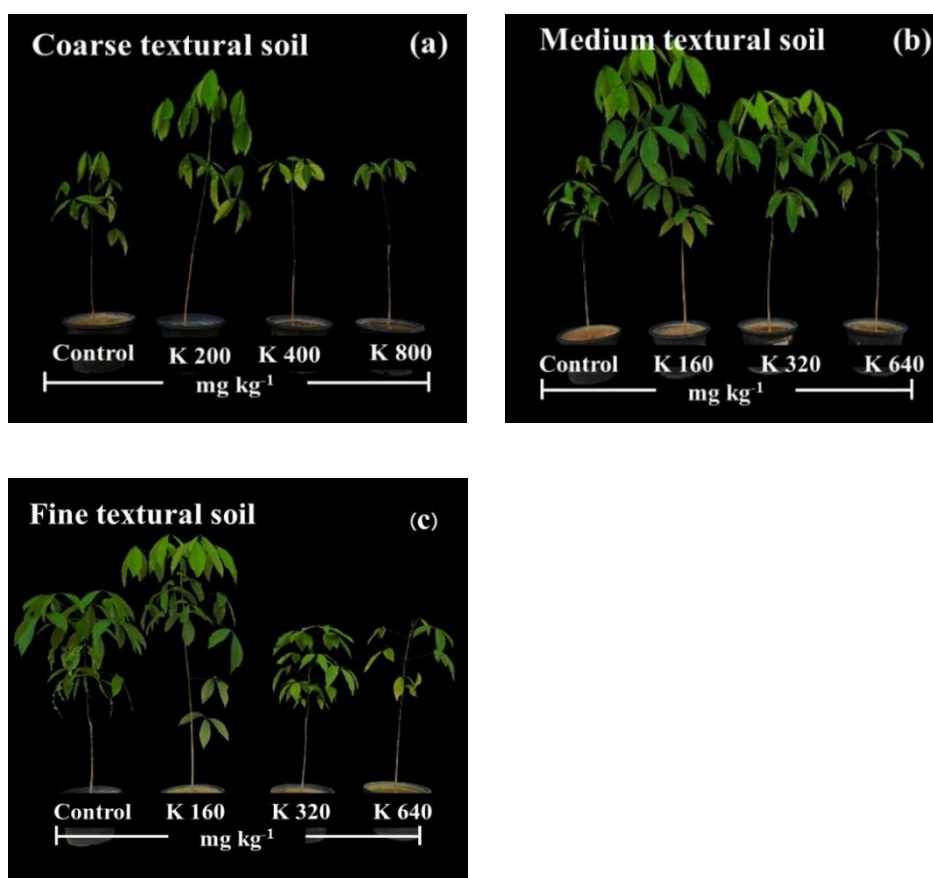
### ผลของปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

กล้ายางพาราทั้งที่ปลูกในดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียดเมื่อได้รับโพแทสเซียมจากปุ๋ยเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการเจริญเติบโตทางด้านความสูงดีขึ้น (Figure 5.1) โดยเฉพาะกล้ายางพาราที่ปลูกในดินเนื้อหยาบและปานกลาง ในขณะที่กล้ายางพาราที่ปลูกในดินเนื้อละเอียด พบว่า การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา 160 mg K kg<sup>-1</sup> ส่งผลให้กล้ายางพาราเจริญเติบโตด้านความสูงดี แต่เมื่อเพิ่มปุ๋ย



โพแทสเซียมเป็นอัตรา 320 หรือ 640 mg K kg<sup>-1</sup> กลับส่งผลให้ความสูงของกล้ายางพาราลดลงเมื่อเทียบกับไม่ใส่ปุ๋ย

การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่สูงขึ้นในดินทั้ง 3 เนื้อดิน พบว่า ต้นกล้ายางพารามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (Figure 5.3) รวมทั้งน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของมวลชีวภาพทั้งหมดใกล้เคียงกันและไม่ได้มีความแตกต่างทางสถิติ (Table 5.4) แต่มีแนวโน้มพบว่า การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินเนื้อหยาบอัตรา 200 mg K kg<sup>-1</sup> และอัตรา 160 mg K kg<sup>-1</sup> ในดินเนื้อปานกลาง และเนื้อละเอียดส่งผลให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของมวลรวมทั้งต้นกล้ายางพารามีค่าสูงกว่าการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตราอื่น ๆ ทั้งนี้การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่เพิ่มขึ้น (320 และ 640 mg kg<sup>-1</sup>) กลับส่งผลให้ผลรวมของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของทั้งต้นกล้ายางพาราลดลง



**Figure 5.1** Effect of K application on the growth of rubber tree grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soils.

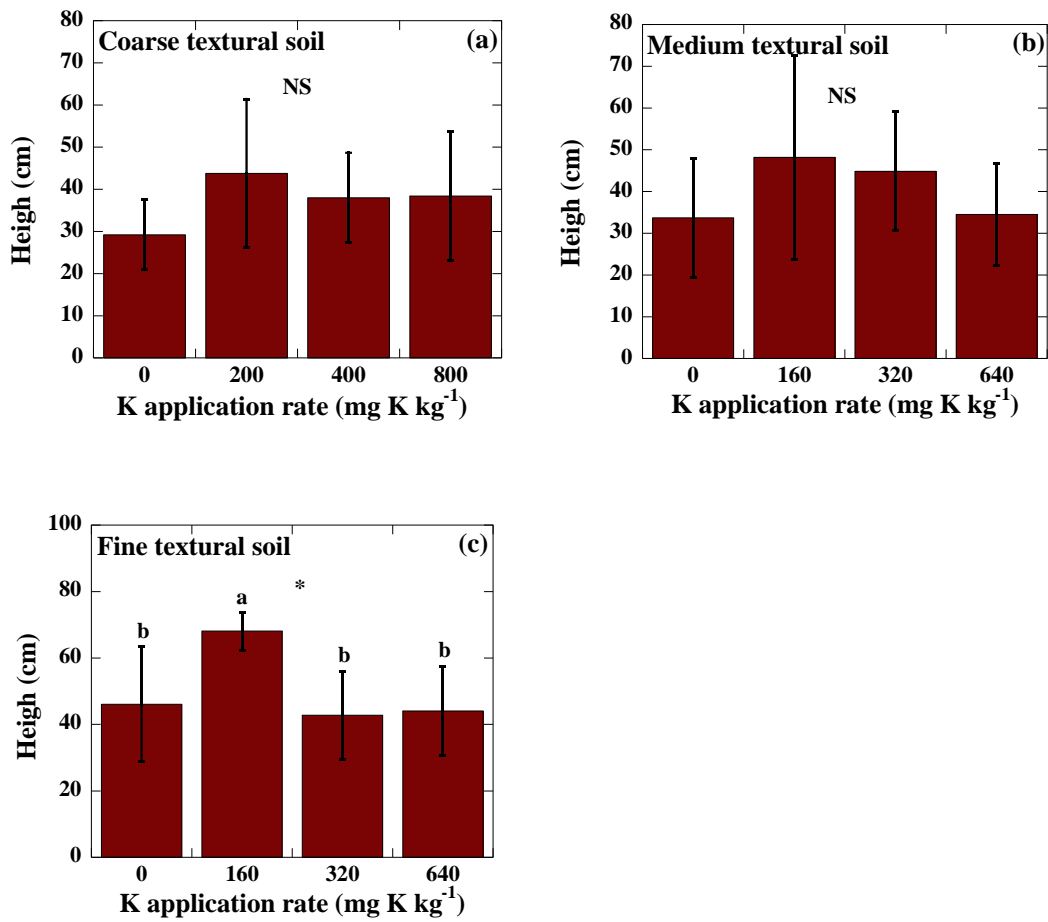


Figure 5.2 Effect of K fertilizer on the height of rubber tree grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soils.

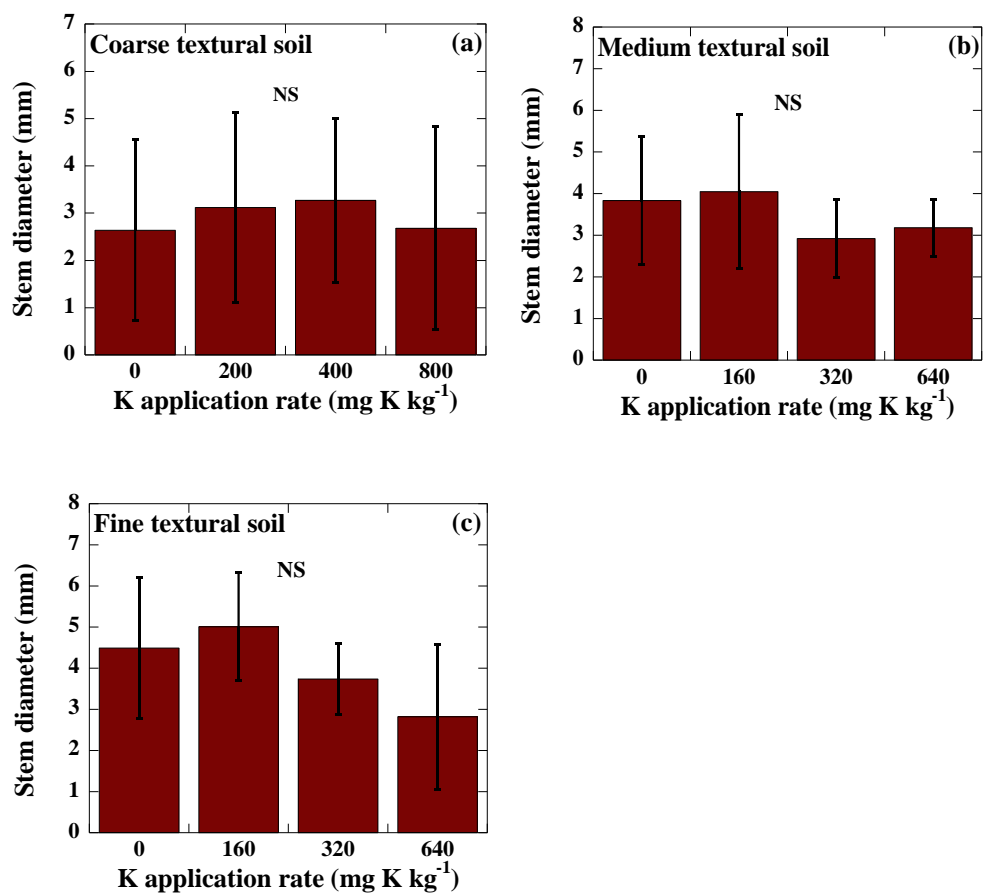


Figure 5.3 Effect of K fertilizer on the stem diameter of rubber tree grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soils.

Table 5.4 Effect of K fertilizer application on fresh and dried weigh of rubber tree.

Soil texture	Treatment Rate of K application (mg K kg <sup>-1</sup> )	Fresh weight (g)			Whole plant (g)	Dried weigh (g)			Whole plant (g)
		Leaf	Root	Stalk		Leaf	Root	Stalk	
Coarse (Kh)	0	12.09ab	12.37	17.15	41.61	4.19a	3.39	6.78	14.36ab
	200	13.90a	16.09	24.49	54.48	3.85a	4.49	8.62	16.96a
	400	5.94b	16.76	17.55	40.25	1.57b	4.28	6.53	12.38ab
	800	4.77b	12.24	16.84	33.85	1.50b	3.26	5.66	10.42b
	F-test	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	*
	C.V. (%)	59.97	39.9	32.29	34.69	62.05	38.44	31.98	30.58
Medium (LL)	0	11.56	14.85	17.03	43.44	4.28	4.33	6.99b	15.60b
	160	16.36	19.64	25.21	61.21	5.93	5.58	13.12ab	24.63ab
	320	25.18	20.61	35.21	81.00	9.89	6.05	13.85a	29.79a
	640	13.57	21.35	26.17	61.09	4.54	5.99	10.43ab	20.96ab
	F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*
	C.V. (%)	70.39	32.65	51.06	48.23	62.44	28.56	42.57	41.45
Fine (Ntn)	0	24.32	20.73	31.61ab	76.66	9.04	6.65	13.23ab	28.92
	160	26.00	15.02	42.58a	83.60	9.31	5.43	17.48a	32.22
	320	16.31	13.30	21.84b	51.45	5.50	4.07	8.29b	17.86
	640	14.41	12.66	26.25ab	53.32	5.09	3.96	9.01b	18.06
	F-test	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns
	C.V. (%)	47.87	34.65	38.85	33.55	67.32	38.32	38.85	35.78

**Remark:** Different letter in same column indicated significant differences between treatment mean at  $P \leq 0.05$ , \* is significant at  $P \leq 0.05$  and ns is not significant

### ผลของโพแทสเซียมต่อการดูดใช้ธาตุอาหารพืช

การดูดใช้ธาตุอาหารของต้นกล้วยพาราในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก ลำต้น และใบ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้กล้วยพาราที่ปลูกในดินเนื้อหยาบมีการดูดใช้ในโตรเจนได้ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่กล้วยพาราที่ปลูกในดินเนื้อปานกลางและเนื้อละเอียดมีการดูดใช้ในโตรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 5.5) โดยแนวโน้มการดูดใช้ในโตรเจนในยางพารามีแนวโน้มลดลงเมื่อยางพาราได้รับปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้แนวโน้มการดูดใช้ฟอสฟอรัสพบว่ามี

แนวโน้มเช่นเดียวกับการดูใช้ในโตรเจน ส่วนการดูใช้แคลเซียมและแมกนีเซียม (Table 5.6) พบว่า ยางพารามีการดูใช้แคลเซียมและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา 200 mg K kg<sup>-1</sup> ในดินเนื้อหยาบหรือ 160 mg K kg<sup>-1</sup> ในดินเนื้อปานกลางและละเอียด แต่เมื่อเพิ่มอัตราปุ๋ยโพแทสเซียมสูงขึ้น พบว่า ยางพารามีการดูใช้แคลเซียมและแมกนีเซียมได้ลดลง

เมื่อประเมินร้อยละการสะสมธาตุอาหารของต้นยางพาราในส่วนใบ ลำต้น และราก พบว่า ร้อยละการสะสมไนโตรเจนส่วนใหญ่พบในใบ > ลำต้น > ราก (Table 5.5) ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่มีการสะสมในใบเป็นหลัก แต่เมื่อใส่โพแทสเซียมในอัตราที่เพิ่มขึ้นพบว่าร้อยละการสะสมในใบลดลงแต่กลับพบว่ามีการสะสมที่ลำต้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสะสมแคลเซียมพบมากในส่วนของลำต้น ส่วนการสะสมแมกนีเซียมพบว่าแนวโน้มเช่นเดียวกับสะสมของแคลเซียม (Table 5.6) การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้ยางพารามีการดูใช้โพแทสเซียมได้เพิ่มขึ้น ทั้ง 3 เนื้อดิน (Figure 5.4) โดยเฉพาะในดินเนื้อละเอียด และปานกลาง ในขณะที่ยางพาราที่ปลูกในดินเนื้อละเอียด พบว่า การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา 160 mg K kg<sup>-1</sup> ส่งผลให้กล้ายางพาราดูใช้โพแทสเซียมสูง แต่เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา 320 และ 640 mg K kg<sup>-1</sup> กลับส่งผลให้การดูใช้โพแทสเซียมลดลง สังเกตได้ว่า ต้นกล้ายางพาราที่ปลูกในดินเนื้อปานกลาง และละเอียด เมื่อมีการใส่โพแทสเซียมในดินสูง ยางพารามีการดูใช้โพแทสเซียมลดลง เมื่อพิจารณาร้อยละการสะสมโพแทสเซียมในส่วนต่าง ๆ ในใบ ราก และลำต้น พบว่า ในดินเนื้อหยาบ และปานกลางมีร้อยละการสะสมโพแทสเซียมบริเวณลำต้น และใบมากกว่าราก เมื่อเติมโพแทสเซียมในอัตราสูงขึ้นในทั้ง 3 เนื้อดิน (Figure 5.5) พบว่า มีการสะสมโพแทสเซียมในลำต้นสูงขึ้น ขณะที่การสะสมในใบลดลง

Table 5.5 Effect of K fertilizer application on N and P uptake.

Soil texture	Treatment K application (mg K kg <sup>-1</sup> )	N uptake distribution (%)			Whole plant (mg pot <sup>-1</sup> )	P uptake distribution (%)			Whole plant (mg pot <sup>-1</sup> )
		Leaf	Root	Stalk		Leaf	Root	Stalk	
Coarse (Kh)	0	41.35ab	19.55ab	39.10ab	226.19	46.16a	28.77	25.51b	8.85ab
	200	51.81a	16.51b	31.68b	255.53	44.80a	24.66	30.54ab	10.82a
	400	24.53b	29.88a	45.59a	199.06	32.83ab	20.36	46.79ab	4.81c
	800	26.71b	26.78ab	46.51a	180.74	23.25b	26.46	50.28a	7.04bc
	F-test	*	**	*	ns	*	ns	*	**
C.V. (%)		19.81	10.59	11.53	12.62	16.94	16.37	19.82	9.02
Medium (LL)	0	49.86b	20.75a	29.39b	246.27c	41.56a	39.07a	19.36b	9.16b
	160	45.02bc	22.38a	32.60b	388.43b	43.42a	37.47a	19.11b	7.85b
	320	58.37a	12.76b	28.87b	474.78a	37.67ab	21.46b	40.87a	20.78a
	640	40.17c	17.24ab	42.59a	347.82b	26.35b	32.28ab	41.37a	12.45b
	F-test	**	**	*	**	**	**	**	**
C.V. (%)		5.20	7.57	9.01	1.30	6.79	7.23	14.05	13.24
Fine (Ntn)	0	34.67b	26.57a	38.76a	209.21b	49.31	24.60	26.09	15.92a
	160	51.30a	15.42ab	33.28b	573.14a	45.79	12.98	41.23	17.15a
	320	55.91a	15.11b	28.98b	256.38b	34.73	16.79	48.48	13.16ab
	640	50.59a	16.58ab	32.83b	253.48b	48.62	20.46	31.02	8.49b
	F-test	**	**	**	**	ns	ns	ns	*
C.V. (%)		4.36	12.42	3.12	9.03	21.11	23.77	21.82	16.68

**Remark:** Different letter in same column indicate significant differences between treatment mean at  $P \leq 0.05$ , \* is significant at  $P \leq 0.05$ , \*\* at  $P \leq 0.01$  and ns is not significant

**Table 5.6** Effect of K fertilizer application on Ca and Mg uptake.

Treatment		Ca uptake distribution				Mg uptake distribution			
Soil textural groups	K application (mg K kg <sup>-1</sup> )	(%)			Whole plant (mg pot <sup>-1</sup> )	(%)			Whole plant (mg pot <sup>-1</sup> )
		Leaf	Root	Stalk		Leaf	Root	Stalk	
Coarse (Kh)	0	21.16	15.81	63.03	74.25a	42.22a	26.09	31.69b	16.76ab
	200	16.48	20.69	62.81	78.53a	36.88ab	37.25	25.87b	19.37a
	400	18.47	17.24	64.29	25.18b	24.15b	21.01	54.84a	8.07c
	800	25.95	20.31	53.74	13.11b	24.35b	20.79	54.86a	10.70bc
F-test		ns	ns	ns	*	*	ns	*	*
C.V. (%)		35.58	66.66	31.91	34.18	16.57	22.53	19.35	20.63
Medium (Ll)	0	56.43a	27.66a	15.92b	34.57b	27.79b	34.61a	39.60	20.16b
	160	42.78ab	19.81ab	19.81ab	63.25ab	29.97ab	28.32a	41.71	28.05a
	320	45.65ab	11.94b	42.41a	97.59a	32.42a	17.07b	43.51	31.78a
	640	26.36b	25.36ab	48.28a	59.70ab	27.78ab	29.09a	43.13	18.56b
F-test		*	*	*	**	**	**	ns	**
C.V. (%)		15.97	24.81	23.01	12.64	8.81	7.63	9.41	4.51
Fine (Ntn)	0	21.17	22.92a	55.91	140.74ab	34.26	25.45a	40.29b	43.32ab
	160	30.03	8.99b	60.98	199.05a	30.35	11.26b	58.40a	58.37a
	320	25.78	8.33b	65.89	137.09ab	29.15	20.37ab	50.48ab	30.75b
	640	23.71	9.47b	66.82	111.11b	28.29	21.59a	50.12ab	25.91b
F-test		ns	*	ns	**	ns	**	**	**
C.V. (%)		21.31	25.90	10.36	11.01	12.56	10.88	6.81	12.02

**Remark:** Different letter in same column indicate significant differences between treatment mean at  $P \leq 0.05$ , \* is significant at  $P \leq 0.05$ , \*\* at  $P \leq 0.01$  and ns is not significant.

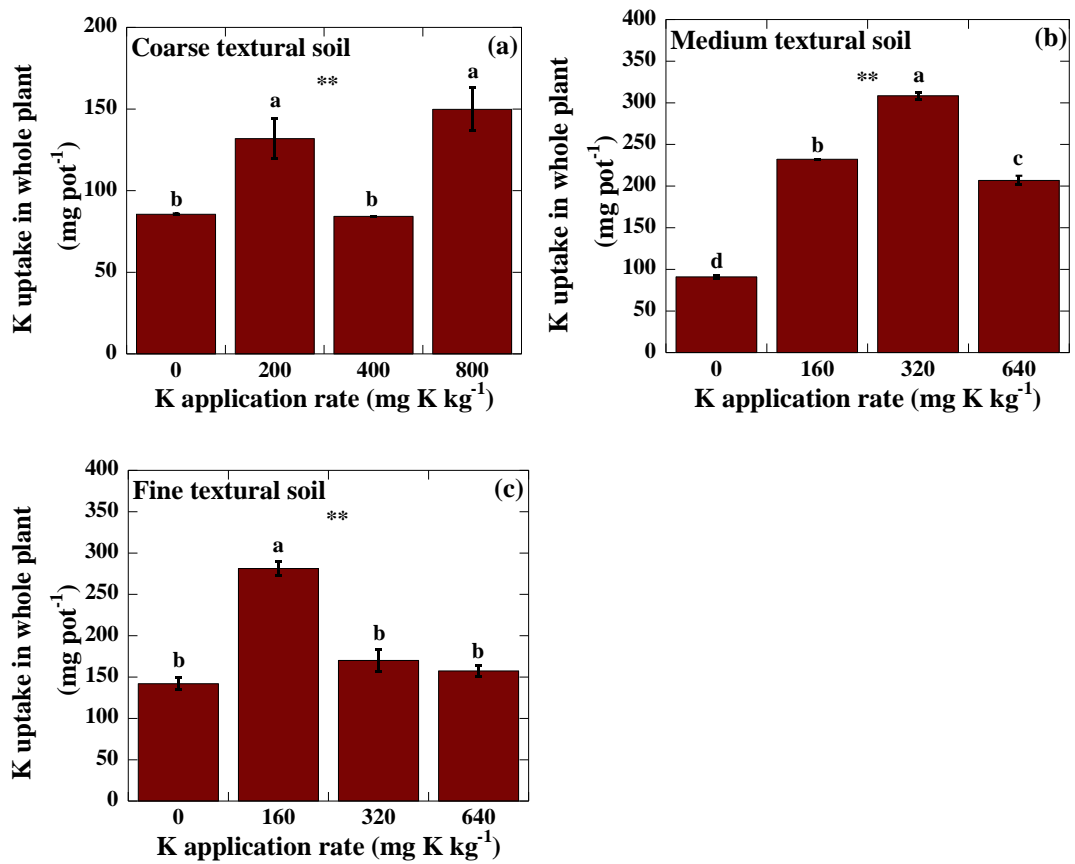


Figure 5.4 Effect of K fertilizer application on K uptake in rubber tree budding grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soil.



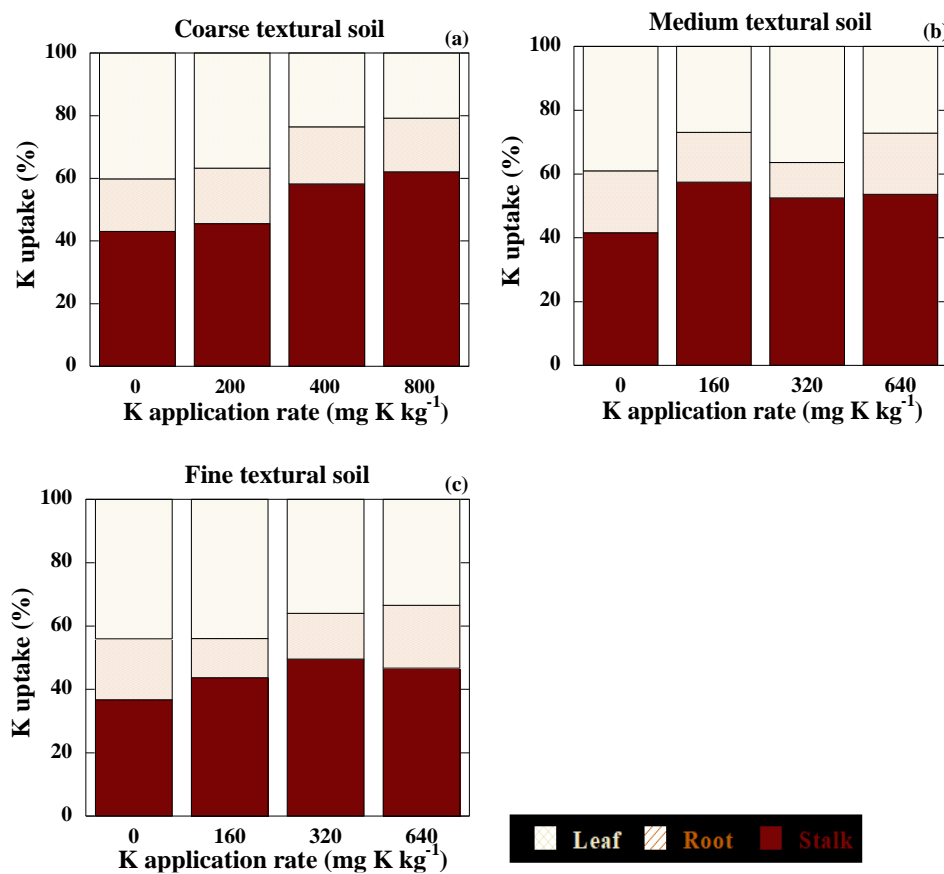


Figure 5.5 Effect of K application on K uptake in particle of rubber tree budding grown in coarse (a) medium (b) and fine (c) textural soil.

#### การเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียมในดินที่ใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตราแตกต่างกัน

ดินหลังการปลูกกล้วยาพาราที่มีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่เพิ่มขึ้น พบว่า โพแทสเซียมในรูป Exch-K และ Car-K ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินทั้ง 3 เนื้อดิน มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (Figure 5.6) ในขณะที่โพแทสเซียมรูปอื่น ๆ ในดินมีแนวโน้มคงที่แม้มีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่สูงขึ้น ทั้งนี้โพแทสเซียมทั้งหมดในดินพบว่ามีค่าความเข้มข้นสูงในดินละเอียด > ปานกลาง > หยาบ และรูปโพแทสเซียมที่มีความเข้มข้นสูงในดิน คือ Res-K > Exch-K > Car-K > Oxide-K > OM-K

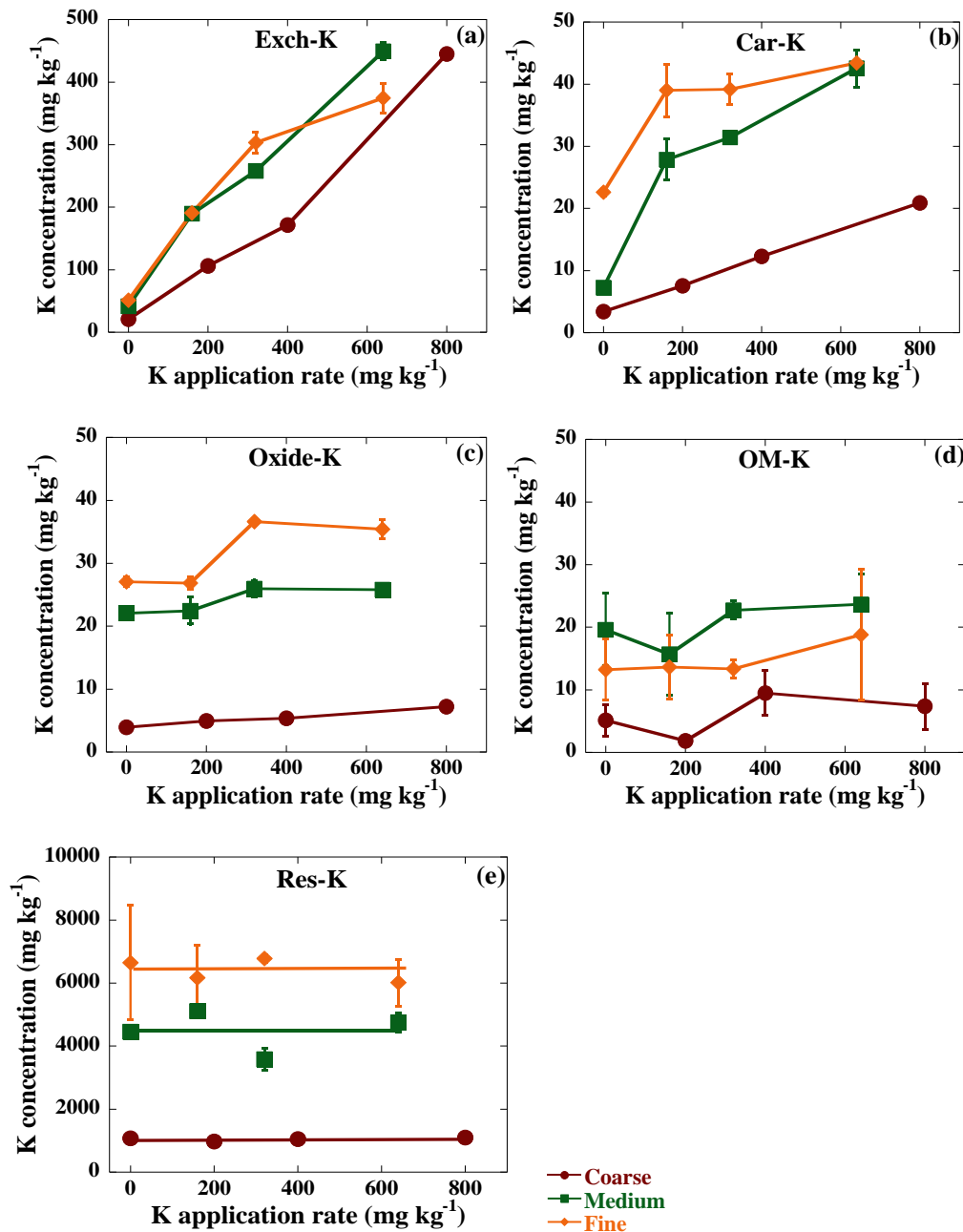


Figure 5.6 K speciation in coarse, medium, and fine texture soils in Exch-K (a), Car-K (b), Oxide-K (c), OM-K (d) and Res-K (e) after plantation

### สมดุลโพแทสเซียมในดินปลูกกล้วยพารา

เมื่อประเมินสมดุลของโพแทสเซียมซึ่งพิจารณาจากผลต่างของโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินและที่ได้รับจากปุ๋ยกับโพแทสเซียมที่ยางพาราดูดนำไปใช้ พบว่า ดินปลูกกล้วยพาราทั้ง 3 เนื้อดินไม่เกิดการเสียสมดุลโพแทสเซียม (Table 5.7) นั่นคือ ดินทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินที่ใช้ทดลองมีปริมาณ

โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในขณะนั้นสูงกว่าปริมาณที่ยางพาราดูดนำไปใช้ ทั้งนี้สมดุลโพแทสเซียมในดินมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินในอัตราที่สูงขึ้น และเมื่อพิจารณาการดูดใช้โพแทสเซียมของยางพารา พบว่า ยางพารามีการดูดใช้โพแทสเซียมในดินสูงเมื่อปลูกในดินเนื้อปานกลาง ละเอียด และเนื้อหยาบ ตามลำดับ

**Table 5.7** Different K fertilizer rate on K uptake and soil K balance.

Soil texture	K fertilizer application (mg K kg <sup>-1</sup> )	K added	K native	K uptake	K balance
Coarse (Kh)	0	0	96.88	85.65	11.23
	200	1400	96.88	131.95	1364.93
	400	2800	96.88	84.24	2812.64
	800	5600	96.88	149.91	5546.97
	Average	2450	96.88	112.94	2433.94
Medium (L)	0	0	308.98	91.02	217.96
	160	1120	308.98	232.14	1196.84
	320	2240	308.98	308.51	2240.47
	640	4480	308.98	206.89	4582.09
	Average	1960	308.98	209.64	2059.34
Fine (Ntn)	0	0	554.33	141.87	412.46
	160	1120	554.33	281.19	1393.14
	320	2240	554.33	170.02	2624.31
	640	4480	554.33	157.38	4876.95
	Average	1960	554.33	187.62	2326.72

## วิจารณ์ผลการทดลอง

### ผลของโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

เมื่อยางพาราได้รับปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้การเจริญเติบโตดีขึ้น โดยดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียดที่ใช้ทำการศึกษา คือ ชุดดินคองหงษ์ ชุดดินลำภูรา และชุดดินนาทอน เป็นดินที่ถูกจัดอยู่ในอันดับ Ultisols เป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์และปริมาณธาตุอาหารต่ำ เมื่อประเมินโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินเทียบกับค่ามาตรฐานระดับที่เหมาะสมกับโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา พบว่าโพแทสเซียมในดินเนื้อหยาบอยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่เนื้อดินปานกลาง และละเอียดจัดอยู่ในระดับปานกลาง (Table 5.2) เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินทำให้ดินมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช

สูงขึ้น (Figure 5.6a) ส่งผลให้ยางพาราดูดใช้โพแทสเซียมได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใส่โพแทสเซียม (Figure 5.4) โดยเฉพาะกล้ายางพาราที่ปลูกในดินเนื้อหยาบและปานกลาง โพแทสเซียมเป็นธาตุช่วยส่งเสริมกระตุ้นเอนไซม์ต่าง ๆ ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน การสังเคราะห์แสง และการควบคุมศักย์ออสโมซิสซึ่งมีบทบาทต่อการขยายขนาดเซลล์พืช โพแทสเซียมเป็นอันตรกิริยาเสริมกันกับกรดจิบเบอเรลลิก (gibberellic acid) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับการยืดของลำต้น (Osotsapa, 2015) ดังนั้นเมื่อพืชได้รับโพแทสเซียมเพียงพอจึงส่งเสริมให้มีการยืดตัวลำต้นทางความสูงได้ดี ในขณะที่ยางพาราที่ปลูกในดินเนื้อละเอียด พบว่า การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตรา  $160 \text{ mg K kg}^{-1}$  ส่งผลให้ยางพาราเจริญเติบโตด้านความสูงดี แต่เมื่อเพิ่มปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่สูงกว่านั้น กลับส่งผลให้ความสูงของยางพาราลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ปุ๋ย มีรายงาน เมื่อใส่โพแทสเซียมสูงทำให้มีการแข่งขันระหว่างธาตุประจวบกร รวมทั้งเกลือจากโพแทสเซียมคลอไรด์สูง (Pottosin and Dobrovinskaya, 2014) ทำให้เกิดปัญหาการดูดใช้น้ำและธาตุอาหาร เกลือที่ละลายในสารละลายดินมาก ทำให้น้ำในดินมีศักย์ออสโมติก (osmotic potential) ต่ำลง ส่งผลให้พืชดูดใช้น้ำได้ยากขึ้น (Brady and Weil, 2008) เมื่อดูดใช้น้ำน้อยธาตุอาหารที่เคลื่อนสู่รากพืชได้น้อย โดยเฉพาะธาตุที่ไหลเป็นกลุ่มก้อนพร้อมกับน้ำ (mass flow) สอดคล้องกับการศึกษาการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมที่ส่งผลให้การเจริญเติบโตของของกล้ายางดีขึ้น แต่เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม ( $\text{K}_2\text{O}$ ) สูงกว่า  $0.25 \text{ kg. m}^{-3}$  ทำให้ด้านความสูง เส้นผ่านและศูนย์กลาง และน้ำหนักชีวมวลลดลง (Correia *et al.*, 2017) อีกทั้งยังมีการศึกษาผลของการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการเจริญเติบโตของของปาล์มน้ำมัน พบว่า เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้ความสูงและเส้นรอบลำต้นของปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ปุ๋ย แต่เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราสูง ( $4082.4 \text{ g K}_2\text{O tree}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) ส่งผลความสูง เส้นรอบลำต้นลดลง (Purwanto and Sudradjat, 2020) เช่นเดียวกับในสวนน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นยางส่วนเหนือดินและราก (Table 5.4) ที่พบว่า เมื่อยางพาราได้ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้น้ำหนักทั้ง 2 แบบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อได้รับโพแทสเซียมมากเกินไปกลับพบว่าผลผลิตที่ได้ลดลงเช่นเดียวกับผลการศึกษาริมาณการเจริญเติบโตของต้นยางพารา

### ผลของโพแทสเซียมต่อการดูดใช้ธาตุอาหารของยางพารา

การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้ยางพารามีการดูดใช้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น (Table 5.5) เนื่องจากโพแทสเซียมส่งเสริมการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนสู่ส่วนเหนือดิน ส่งเสริมการเคลื่อนย้ายของไนโตรเจนทำให้การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนมีประสิทธิภาพมากขึ้น และโพแทสเซียมช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน (Barker and Pilbeam, 2007) สอดคล้องกับการศึกษาการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมต่อประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจนของฝ้าย พบว่า ประสิทธิภาพการดูดใช้ไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม (Khalifa *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราสูงจะส่งผลให้ต้นกล้ายางพาราดูดใช้แคลเซียมและแมกนีเซียมได้ลดลง (Table 5.6) เนื่องจากโพแทสเซียมในสารละลายดินสูงเป็นอันตรกิริยาเชิง

ลบในการดูดธาตุอาหารของแคลเซียม และแมกนีเซียม (Osotsapa, 2015; Loide, 2004) มีรายงานในดินปลูกยางพาราที่ได้รับแมกนีเซียมมากเกินไปทำให้การดูดใช้แคลเซียมและโพแทสเซียมลดลง (Pongthai *et al.*, 2017) การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมทำให้การดูดใช้โพแทสเซียมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ปุ๋ย (Figure 5.4) การดูดใช้โพแทสเซียมจะเห็นได้ชัดในดินเนื้อหยาบ และปานกลาง เมื่อเทียบกับการไม่ใส่ปุ๋ย เนื่องจากพืชมีการตอบสนองต่อปุ๋ยโพแทสเซียมได้ดีในดินที่มีโพแทสเซียมต่ำ (Singh *et al.*, 2002) อีกทั้งในทางปฏิบัติการใส่ปุ๋ยอัตราที่ต่ำ แต่เพิ่มจำนวนครั้งใส่ปุ๋ย ส่งผลให้การเจริญเติบโตและมีประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมดีกว่าการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราสูงเพียงครั้งเดียว โดยประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมเมื่อใส่ให้แก่พืช พบว่า พืชสามารถดูดนำไปใช้ได้เพียงร้อยละ 20-40 (Baligar and Bennett, 1986) ดังนั้น โพแทสเซียมส่วนหนึ่งที่ใส่ไปในรูปของปุ๋ยจึงอาจเกิดการสูญเสียได้ง่ายโดยเฉพาะในดินเนื้อหยาบที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำ

การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมทำให้การสะสมของไนโตรเจนส่วนใหญ่อยู่ที่ใบ (Khalifa *et al.*, 2012 ; Hu *et al.*, 2016) การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราสูงมีผลให้ความเข้มข้นแคลเซียม และแมกนีเซียมในใบและเหง้าขมิ้นชันลดลง รวมถึงสารเคอร์คูมินอยด์ลดลง (Wattanawangjongsuk *et al.*, 2022) ร้อยละการสะสมแคลเซียมส่วนใหญ่สะสมในลำต้น และใบ (Table 5.6) แคลเซียมเป็นธาตุไม่เคลื่อนย้ายในพืช การสะสมแคลเซียมในพืชขึ้นกับการคายน้ำเป็นหลัก ใบเป็นส่วนของพืชที่คายน้ำมากจึงมีแคลเซียมสะสมอยู่มาก (Poovarodom and Boonplang, 2014) โดยแคลเซียมเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ สร้างความแข็งแรงให้กับท่อลำเลียงน้ำและอาหาร (Barker and Pilbeam, 2007) อีกทั้งยังช่วยให้ต้นยางต้านทานต่อการเข้าทำลายของเชื้อสาเหตุโรคพืช เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่เพิ่มขึ้นร้อยละการสะสมโพแทสเซียมในลำต้นสูงขึ้น (Figure 5.5) เนื่องจากโพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในการเคลื่อนย้ายแป้งและซูโครสเข้าสู่ท่ออาหาร และส่งเสริมเคลื่อนย้ายสารในท่ออาหารได้มากขึ้น (Osotsapa, 2015) อ้อยที่ได้รับโพแทสเซียมเพียงพอสามารถย้ายสารที่ได้จากการสังเคราะห์ สารจะถูกลำเลียงไปเก็บไว้ในลำต้นซึ่งเป็นที่เก็บน้ำตาล (Hartt, 1969) สอดคล้องกับการศึกษาการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมต่อการการสะสมในแต่ละส่วนของถั่วแขก (*Phaseolus vulgaris* L.) พบว่า ปริมาณโพแทสเซียมสะสมในฝัก และลำต้น-ก้าน มากกว่าในใบ (Tuma *et al.*, 2004)

### การเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียม และสมดุลโพแทสเซียมในดิน

โพแทสเซียมรูปที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดในดิน คือ Res-K ถึงแม้จะมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่เพิ่มขึ้นแต่การเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมในรูปนี้ค่อนข้างคงที่ (Figure 5.6e) โพแทสเซียมรูปนี้เป็นรูปที่พืชดูดไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ทันที เนื่องจากเป็นโพแทสเซียมในรูปที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (Tessier *et al.*, 1979) ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการผุพังสลายตัวจึงเป็นประโยชน์แก่พืชได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าโพแทสเซียมในรูปตะกอนตกค้างมีปริมาณลดลงทั้ง 3 เนื้อดิน (Table

5.3) อาจเนื่องจากกลไกของรากพืชในการปรับตัว (Ambily, 2022) ยางสามารถขับกรดออกซาลิก (Onthong and Osaki, 2006) ออกมาเพื่อละลายโพแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ซึ่งเป็นรูปโพแทสเซียมที่พืชไม่สามารถดูดนำไปใช้ได้ให้กลายเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช นอกจากนี้แบคทีเรียใน *Bacillus aryabhattai SK1-7* มีรายงานว่าสามารถหลั่งสารอินทรีย์ออกมาทำปฏิกิริยากับแร่ประกอบโพแทสเซียม (Chen *et al.*, 2022) เพื่อปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาเป็นประโยชน์แก่พืช

Exch-K (Figure 5.6a) เป็นโพแทสเซียมที่ถูกดูดซับบริเวณประจุไฟฟ้าลบบริเวณคอลลอยด์ดินและอินทรีย์วัตถุ (Tessier *et al.*, 1979) ในดินเนื้อหยาบและเนื้อปานกลางมี Exch-K ต่ำกว่าดินเนื้อละเอียด ดินที่ใช้ศึกษาส่วนใหญ่มีแร่เคลอไลต์เป็นหลัก (Table 4.1) ส่งผลให้ดินมีประจุไฟฟ้าลบต่ำ ดินมีค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ (CEC 1.54 – 10.91  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) (Table 5.2) ทำให้ความสามารถในการดูดซับโพแทสเซียมต่ำ สอดคล้องกับการศึกษาการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพารา ที่พบว่า เมื่อเติมความเข้มข้นโพแทสเซียมในดินสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการตรึงโพแทสเซียมในดินลดลง (Table 4.4) เนื่องจากดินเป็นเนื้อหยาบและเนื้อปานกลางที่มีแร่เคลอไลต์เป็นหลัก ซึ่งมีพื้นที่ผิวในการดูดซับจำกัด ประจุไฟฟ้าบริเวณพื้นที่ผิวดูดซับจึงเกิดการดูดซับโพแทสเซียมและเกิดการอึดตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับได้ต่ำ ส่งผลให้ดินมี Exch-K เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม สอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับโพแทสเซียมในชุดดินเชิงคานที่ใช้ปลูกอ้อย พบว่า หลังจากใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินส่งผลให้พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนของดินมีความอึดตัวด้วยโพแทสเซียม เมื่อปุ๋ยโพแทสเซียมได้รับความชื้น ส่งผลให้เกิดการแตกตัวให้เป็นโพแทสเซียมไอออนในสารละลายดินหรืออยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถสูญเสียโพแทสเซียมออกไปจากดินหรือการเคลื่อนย้ายโดยการชะละลายลงไปในชั้นดินล่างได้ (Darunsontaya *et al.*, 2018) อย่างไรก็ตามหากใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้ดินสูญเสียโพแทสเซียมในรูปนี้ได้ง่าย ในขณะที่ดินเนื้อละเอียดเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมอัตราสูง (320 และ 640  $\text{mg K kg}^{-1}$ ) การดูดซับโพแทสเซียมบริเวณผิวคอลลอยด์ดินโดยประจุไฟฟ้าก็ดำเนินขึ้น และอาจเกิดการตรึงโพแทสเซียมส่วนหนึ่งไว้บริเวณหลีบของแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 ซึ่งในดินเนื้อละเอียดที่ศึกษา พบว่า มีแร่โอลไลต์และแร่ผสมระหว่างโอลไลต์และมอนมอนมอลิโนต์สูงกว่าในดินเนื้อปานกลางและหยาบ (Table 4.1) นอกจากแร่ดินเหนียวมอนมอลิโนต์ (-150 ถึง -80  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) มีประจุไฟฟ้าลบสุทธิสูงกว่าเคลอไลต์ (-15 ถึง -1  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) แล้วยังมีประจุไฟฟ้าลบระหว่างหลีบของแร่ดินเหนียวจึงทำให้เกิดการตรึงโพแทสเซียมระหว่างช่องว่างของแร่ดินเหนียวได้ดีกว่าแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 ฉะนั้นการเติมปุ๋ยโพแทสเซียมลงในดิน ส่วนหนึ่งจะถูกพืชดูดไปนำใช้ และมีบางส่วนถูกดูดซับและถูกตรึงไว้ในดิน จึงส่งผลให้รูปของโพแทสเซียมต่าง ๆ ในดินเพิ่มขึ้นตามระดับปุ๋ยโพแทสเซียมที่เติม (Figure 5.6)

Car-K เป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกับ Exch-K (Cheng *et al.*, 2011) เนื่องจาก โปแทสเซียมรูปนี้แปรผันตรงตามพีเอชดิน ในดินที่มีพีเอชสูงจะมี Car-K สูง แต่ดินในภาคใต้ส่วนใหญ่เป็นดินกรดมีพีเอชต่ำ ซึ่งมีไฮโดรเจน ( $H^+$ ) ไอออนในสารละลายดินอยู่มากในสารละลายดิน เมื่อใส่ปุ๋ยโปแทสเซียมลงไปดินทำให้โปแทสเซียมมีประโยชน์ในดินเพิ่มมากขึ้น โปแทสเซียมส่วนหนึ่งสะสมอยู่ในรูป Car-K (Figure 5.6b) ทั้งนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่าง Exch-K กับ Car-K (Table 3.8) เมื่อ Exch-K เพิ่มขึ้น Car-K เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

Oxide-K (Figure 5.6c) และ OM-K (Figure 5.6d) พบปริมาณในดินได้น้อย โปแทสเซียมทั้ง 2 รูปนี้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากปลูกพืชและมีการเติมปุ๋ยโปแทสเซียมในดิน ซึ่งดินในภาคใต้เป็นดินที่มีการพัฒนาการสูงและส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในอันดับ Ultisols ซึ่งมีคอลลอยด์ดินส่วนใหญ่เป็นแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 รวมทั้งเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งเป็นคอลลอยด์ดินที่มีประจุไฟฟ้าลบต่ำ โดยรูป Oxide-K มีองค์ประกอบของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งเป็นคอลลอยด์ดินประเภทหนึ่ง ที่ประจุลบในดินขึ้นอยู่กับค่าพีเอชดิน ดินมีออกไซด์ของเหล็ก อะลูมิเนียม และแมงกานีสสูงมักมีประจุไฟฟ้าลบปริมาณน้อย ทำให้สามารถดูดซับโปแทสเซียมรวมถึงแคตไอออนอื่น ๆ ได้ต่ำ (Brady and Weil, 2008) ในขณะที่ OM-K เป็นโปแทสเซียมที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ เช่น ซากพืช ซากสิ่งมีชีวิต (Tessier *et al.*, 1979) ในสภาพภูมิอากาศภาคใต้ของไทยที่ร้อนชื้นส่งเสริมการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุได้ดี ส่งผลให้ดินในภาคใต้ส่วนใหญ่มีอินทรีย์วัตถุต่ำ (Carter, 2002) ปริมาณโปแทสเซียมรูปนี้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากปลูกยางพารา ทั้ง 3 ดิน เนื่องจากการร่วงหล่นของใบและส่วนของพืช และชิ้นส่วนพืชขนาดเล็กที่ตกค้างอยู่ในดิน เช่น รากฝอยหรือสารอินทรีย์และอนินทรีย์อื่น ๆ สอดคล้องกับรายงานการปลูกพืชร่วมยางพาราที่พบว่าส่งผลให้อินทรีย์วัตถุในดินเพิ่มขึ้น (Saeteaw *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม โปแทสเซียมรูปนี้เป็นรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที (Cheng *et al.*, 2011) แต่จะค่อย ๆ ถูกปลดปล่อยออกมาในดิน จากการศึกษาพบความสัมพันธ์ของ Oxide-K และ Min-K เช่นเดียวกับ OM-K ที่มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ Fixed-K และ Min-K ซึ่งสกัดแบบลำดับขั้น (Table 3.9) กับโปแทสเซียมแบ่งตามรูปโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ทั้งนี้โปแทสเซียมในรูป Oxide-K และ OM-K อาจเป็นแหล่งสำรองของโปแทสเซียมสำหรับการดูแลแก่พืชได้ เนื่องจากจะต้องมีการปลดปล่อยหรือสลายตัวเสียก่อน

การประเมินสมดุลธาตุโปแทสเซียมในดิน สามารถใช้บ่งชี้ถึงการเพิ่มหรือลดของระดับธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ที่มีอยู่ในดิน (Oenema *et al.*, 2003) ดินปลูกกล้วยพาราที่ใช้ศึกษามีระดับโปแทสเซียมที่เป็นประโยชน์แก่พืชในระดับต่ำถึงปานกลาง (Table 5.2) การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของโปแทสเซียมในดิน โดยทั่วไปเป็นการใช้ปุ๋ยที่เป็นแหล่งโปแทสเซียม การปลูกพืชหมุนเวียน (Steiner *et al.*, 2012) และการใช้ปุ๋ยคอก (Balík *et al.*, 2019) เพื่อเป็นแหล่งโปแทสเซียมและธาตุอาหารอื่น ๆ ทำให้สมดุลธาตุอาหารในดินมีมากขึ้น ดินทั้ง 3 ดินเมื่อมีการใส่ปุ๋ยโปแทสเซียมในอัตรา

ที่สูงขึ้น พบว่า สมดุลความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินเพิ่มสูงขึ้น (Table 5.7) ค่าเฉลี่ยสมดุลโพแทสเซียมสูงในดินเนื้อหยาบ เนื่องจากปริมาณปุ๋ยโพแทสเซียมใส่มากกว่าดินเนื้อปานกลาง และละเอียด แม้ว่าในดินเนื้อหยาบมีสมดุลโพแทสเซียมสูงแต่ความสามารถในการปลดปล่อยโพแทสเซียมกลับพบว่าต่ำกว่าดินเนื้อปานกลาง และละเอียด (Figure 4.1b) เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดใช้โพแทสเซียมของยางพาราที่ปลูกในดินเนื้อปานกลาง พบว่า มีการดูดใช้โพแทสเซียมในปริมาณที่สูงกว่าดินเนื้อหยาบ และละเอียด สอดคล้องกับที่มีรายงานว่า ดินเนื้อปานกลาง เช่น ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) เป็นเนื้อดินที่เหมาะสมสำหรับการปลูกยางพารา (Surawanit, 2011) อย่างไรก็ตาม สมดุลโพแทสเซียมในดินหยาบ หากไม่มีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมเพื่อรักษาสสมดุลโพแทสเซียมพืชมีโอกาสขาดโพแทสเซียมได้ สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ในการต้านทานโพแทสเซียม ( $BC_r$ ) พบว่า ดินเนื้อหยาบสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงระดับโพแทสเซียม และความสามารถในการรักษาระดับโพแทสเซียมต่ำกว่า ดินเนื้อปานกลาง และละเอียด (Figure 4.1a) มีรายงานถึงสมดุลโพแทสเซียมในดินปลูกข้าวสาลีและข้าวที่มีระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ พบว่า ข้าวสาลีและข้าวมีการดูดใช้สะสมโพแทสเซียมในพืชมากกว่าระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดิน ดังนั้น เมื่อประเมินสมดุลจึงพบว่า ดินมีสมดุลโพแทสเซียมเป็นลบ (ดินสูญเสีย K มากกว่าได้รับ) แม้โพแทสเซียมในรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable) มีการปลดปล่อยโพแทสเซียมออกมาให้พืชดูดนำไปใช้เมื่อดินมีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมพบว่า พืชตอบสนองต่อปุ๋ยโพแทสเซียมและส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตดีกว่าไม่ใส่ปุ๋ย (Singh *et al.*, 2002 ; Li *et al.*, 2020) ถึงแม้ว่า ดินจะโพแทสเซียมที่เป็นแหล่งสำรองอยู่ แต่อาจไม่ทันต่อความต้องการการดูดใช้ของพืช ดังนั้น ปุ๋ยโพแทสเซียมยังคงเป็นแหล่งสำคัญต่อการทำการเกษตร จึงควรจัดการปุ๋ยโพแทสเซียมเพื่อให้ดินมีปริมาณโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพียงพอต่อความต้องการของพืช

### สรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินปลูกกล้วยซึ่งเป็นดินที่มีโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำในเนื้อหยาบ และปานกลาง ในขณะที่ดินเนื้อละเอียดโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์อยู่ระดับปานกลาง เมื่อกล้วยพาราได้รับโพแทสเซียมทำให้การเจริญเติบโตด้านความสูงของต้นยางเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในดินเนื้อหยาบและปานกลาง ในขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลาง น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของชีวมวลใกล้เคียงกันไม่มีความแตกต่าง การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้การดูดใช้โพแทสเซียมเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมการดูดใช้ของไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในปริมาณสูงกลับพบว่าการดูดใช้ แคลเซียม และแมกนีเซียมลดลง ร้อยละการสะสมของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมที่ยางพาราดูดนำไปใช้พบว่าส่วนใหญ่มีการสะสมในใบมากกว่า ลำต้น และราก แต่แคลเซียมมีการสะสม



ในลำดับเป็นหลัก เมื่อเติมโพแทสเซียมสูงขึ้นการสะสมโพแทสเซียมในใบลดลง แต่ในลำดับเพิ่มขึ้นเมื่อวิเคราะห์โพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินหลังปลูกกล้วย พบว่า ในดินเนื้อทั้ง 3 เนื้อดินโพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป Res-K > Exch-K > Car-K > Oxide-K > OM-K ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของรูปต่าง ๆ พบว่า Exch-K และ Car-K มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มการสะสมในดินเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินในอัตราที่สูงขึ้นซึ่งโพแทสเซียมทั้ง 2 รูปนี้เป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ในขณะที่ Oxide-K และ OM-K พบว่า มีความเข้มข้นในดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อพิจารณาสมดุลโพแทสเซียมในดิน พบว่า ดินมีสมดุลโพแทสเซียมเพิ่มขึ้นเมื่อดินได้รับปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่สูงขึ้น ดังนั้น ดินปลูกยางพาราจึงควรมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการ เพื่อเป็นการรักษาสสมดุลของโพแทสเซียมในดิน

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาสถานะและโพแทสเซียมบัพเฟอร์ในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ แบ่งออกเป็น 3 การทดลองย่อย คือ 1) การกระจายตัวของรูปโพแทสเซียมในเนื้อดินที่แตกต่างกันในดินปลูกยางพาราภาคใต้ของประเทศไทย 2) การตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย และ 3) สมดุลโพแทสเซียมและการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินปลูกกล้วยางพาราในภาคใต้ของประเทศไทย สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. **สถานะและรูปโพแทสเซียมในดิน** ความเข้มข้นของโพแทสเซียมรูปต่าง ๆ ในดินเพิ่มสูงขึ้นในดินเนื้อหยาบ ปานกลาง และละเอียด ตามลำดับ โพแทสเซียมที่สกัดด้วยวิธีแบ่งตามความเป็นประโยชน์ของพืช (SLE) พบว่า โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $\text{Min-K} > \text{Fixed-K} > \text{Exch-K} > \text{Sol-K}$  และวิธีการสกัดตามลำดับขั้น (SEP) พบว่า โพแทสเซียมอยู่ในรูป  $\text{Res-K} > \text{Exch-K} > \text{Oxide-K} > \text{OM-K} > \text{Car-K}$  โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที และดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีโพแทสเซียมเป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง
2. **ความสัมพันธ์ของรูปโพแทสเซียมในดินที่สกัดด้วยวิธี SLE และ SEP** โพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชทั้ง 2 วิธี พบความสัมพันธ์เชิงบวกสูงกับอินทรีย์วัตถุ ค่าความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออน และอนุภาคดินเหนียว ทั้งนี้การสกัดโพแทสเซียมในดินด้วยวิธี SEP ไม่เพียงแต่เป็นการสกัดโพแทสเซียมเพื่อประเมินระดับของโพแทสเซียมเท่านั้น แต่ปริมาณของโพแทสเซียมที่สกัดได้ยังพบความสัมพันธ์เชิงบวกสูง SLE โดยผลรวมของ  $\text{Exch-K}$  กับ  $\text{Car-K}$  มีความสัมพันธ์กับ  $\text{NH}_4\text{OAc-K}$  ( $r^2=0.94$ ) ผลรวมของ  $\text{Oxide-K}$  กับ  $\text{OM-K}$  มีความสัมพันธ์กับ  $\text{Fixed-K}$  ( $r^2=0.84$ ) และ  $\text{Res-K}$  พบความสัมพันธ์กับ  $\text{Min-K}$  ( $r^2=0.83$ ) ดังนั้น SEP จึงสามารถประเมินความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมได้เช่นเดียวกับ SLE
3. **การต้านทานการเปลี่ยนแปลงระดับโพแทสเซียมในดิน** ประเมินได้จากการตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดิน พบว่า ดินปลูกยางพาราที่ศึกษามีความสามารถในการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมต่ำ การตรึงและการปลดปล่อยโพแทสเซียมในดินเกิดได้ดีในดินเนื้อละเอียด ดินปลูกยางพาราในภาคใต้ทั้ง 3 กลุ่มเนื้อดินมีค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานโพแทสเซียม ( $\text{BC}_K$ ) สูงอยู่ในช่วง 0.7-0.8 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินโพแทสเซียมร้อยละ 70-80 อยู่ในสารละลายดินและรูปที่แลกเปลี่ยนได้ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที ในขณะที่ร้อยละ 20-30 ของปริมาณที่ใส่ถูกตรึงไว้ในดิน

4. **การเจริญเติบโตของกล้ายางพาราต่อปุ๋ยโพแทสเซียม** การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมส่งผลให้ ความสูงของต้นยางเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะยางพาราที่ปลูกในดินเนื้อหยาบและปานกลาง ซึ่งมี โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่ในระดับต่ำและปานกลาง ตามลำดับ ในขณะที่เส้นผ่าน ศูนย์กลาง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งของชีวมวลมีค่าใกล้เคียงกัน การใส่ปุ๋ยโพแทสเซียม ส่งผลให้กล้ายางพารามีการดูดใช้โพแทสเซียมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมปริมาณสูง พบว่า กล้ายางพารามีการดูดใช้แคลเซียมและแมกนีเซียมได้ลดลง
5. **สมดุลโพแทสเซียมและการเปลี่ยนแปลงรูปของโพแทสเซียมในดินหลังปลูกพืช** โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูป Res-K > Exch-K > Car-K > Oxide-K > OM-K เมื่อ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของรูปโพแทสเซียมในดินหลังปลูกกล้ายางพาราที่ใส่ปุ๋ย โพแทสเซียมระดับต่าง ๆ พบว่า Exch-K และ Car-K ซึ่งเป็นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมีความ เข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่วน Oxide-K และ OM-K มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ สมดุล โพแทสเซียมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในอัตราที่สูงขึ้น
6. **ข้อเสนอแนะ** ดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีโพแทสเซียมในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่ใน ระดับต่ำถึง ปานกลาง จึงควรมีการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมและปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกันเพื่อเป็นแหล่ง ให้โพแทสเซียม เนื่องจากดินปลูกยางพาราในภาคใต้มีโพแทสเซียมที่อยู่ในรูปที่ถูกตรึงและ องค์กรประกอบของแร่ซึ่งเป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันทีแต่มีศักยภาพที่จะกลายเป็นรูปที่ เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ในปริมาณสูง ดังนั้น ควรมีการประยุกต์ใช้แบคทีเรียละลายแร่ โพแทสเซียม (K solubilizing bacteria; KSB) ร่วมกับการวิจัยการกระตุ้นให้ยางพารา สามารถหลังกรดอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนโพแทสเซียมในดินจากรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชให้พืช สามารถดูดนำไปใช้ได้ร่วมกับการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมและปุ๋ยอินทรีย์ จึงน่าจะเป็นการจัดการ โพแทสเซียมในดินปลูกยางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในสภาวะปัจจุบันที่ ปุ๋ย โพแทสเซียมมีราคาสูง

**กล่าวโดยสรุป** รูปของโพแทสเซียมในดินปลูกยางพาราในภาคใต้ที่ประเมินโดยวิธี SLE และ SEP พบความสัมพันธ์กันสูง โพแทสเซียมในดินส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 95 อยู่ในรูปที่ พืชไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทันที ดินมีศักยภาพในการตรึงและปลดปล่อยโพแทสเซียมได้ต่ำ เมื่อใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมในดินจึงส่งผลให้กล้ายางพารามีการเจริญเติบโตดีขึ้น รวมทั้ง โพแทสเซียมรูปที่เป็นประโยชน์ในดิน และสมดุลโพแทสเซียมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น SEP สามารถใช้การประเมินความเป็นประโยชน์ของโพแทสเซียมในดินได้ สำหรับในดินปลูก ยางพาราในภาคใต้ซึ่งมีระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำถึงปานกลางกว่าระดับที่ เหมาะสมจึงต้องมีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมร่วมกับการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพื่อให้ดินมีระดับ

โพแทสเซียมที่เพียงพอต่อความต้องการของยางพารา นอกจากนั้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม การประยุกต์ใช้แบคทีเรียละลายแร่โพแทสเซียมและเทคนิคการกระตุ้นรากยางพาราให้ สามารถหลั่งกรดอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนโพแทสเซียมรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันทีซึ่งมีมากใน ดินปลูกยางพาราในภาคใต้ให้ยางพาราสามารถนำไปใช้ได้ร่วมกับการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมและ ปุ๋ยอินทรีย์ก็จะยิ่งส่งผลให้ดินมีระดับโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ และการจัดการ โพแทสเซียมในดินปลูกยางพารามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Ambily, K.K. 2022. Rhizosphere adaptations of natural rubber (*Hevea brasiliensis*) plants. Research Square : 1-21.
- Bai, S., Tan, J., Zhang, Z., Wei, M., Zhang, H. and Jiang, X. 2023. Phosphorus speciation and colloidal phosphorus response to the cessation of fertilization in lime concretion black soil. *Pedosphere* [In press].
- Baligar, V.C. and Bennett, O.L. 1986. NPK-fertilizer efficiency—a situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research*. 10 : 147-164.
- Balík, J., Černý, J., Kulhánek, M., Sedlár, O. and Suran, P. Balance of potassium in two long-term field experiments with different fertilization treatments. *Plant, Soil and Environment*. 65(5) : 225-232.
- Bank of Thailand. 2020. Regional financial statistics (Online). Available: [https://www.bot.or.th/Thai/Statistics/RegionalEconFinance/Pages/ForeignTrad\\_SR.aspx](https://www.bot.or.th/Thai/Statistics/RegionalEconFinance/Pages/ForeignTrad_SR.aspx). [26 April 2021].
- Barker, V.A. and Pilbeam, J.D. 2007. *Handbook of Plant Nutrition*. Boca Raton : Taylor and Francis Group CRC Press.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. New Jersey : Pearson Education.
- Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94: 38-47.
- Chaipanich, P., Kongsin, J., Chantuma, A., Wichitchonlachai, T. and Thammasiri, Y. 2004. Nutrient Levels in The Soil and in The Rubber Trees in The New Rubber Planting Zone. Bangkok: Rubber Research Institute, Department of Agriculture.

- Chaipanich, P., Pattanakul, C., Kosaisewee, D., Maenmeun, S. and Thammasiri, Y. Plant Nutrients Level in Shallow Soil for New Rubber Planting Area. 2004. Bangkok: Rubber Research Institute, Department of Agriculture.
- Chen, H., Koopal, L.K., Xiong, J., Avena, M. and Tan, W. 2017. Mechanisms of soil humic acid adsorption onto montmorillonite and kaolinite. *J Colloid Interface Sci.* 504 : 457-467.
- Chen, X., Wei, X., Hao, M. and Zhao, J. 2019. Changes in soil iron fractions and availability in the loess belt of northern China after 28 years of continuous cultivation and fertilization. *Pedosphere.* 29 : 123-131.
- Chen, Y., Yang, H., Shen, Z. and Ye, Y. 2022. Whole-genome sequencing and potassium-solubilizing mechanism of *Bacillus aryabhattai* SK1-7. *Frontiers in Microbiology.* 12 : 1-9.
- Chen, Y., Ye, J. and Kong, Q. 2020. Potassium-solubilizing activity of *Bacillus aryabhattai* SK1-7 and its growth-promoting effect on *Populus alba* L. *Forests.* 11(12) : 1-9.
- Cheng, Z., Lee, L., Dayan, S., Grinshtein, M. and Shaw, R. 2011. Speciation of heavy metals in garden soils: evidences from selective and sequential chemical leaching. *J Soils Sediments.* 11 : 628-638.
- Correia, M.A.R., Maranhão, D.D.C., Flores, R.A., Júnior, S.F.S., Araujo, M. A. and Leite, R. L. L. 2017. Growth, nutrition and production of dry matter of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in function of K fertilization. *Australian Journal of Crop Science.* 11(1) : 95-101.

Cox, A.E., Joern, B.C., Brouderand, S.M. and Gao, D. 1999. Plant-available potassium assessment with a modified sodium tetraphenylboron method. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 902-911.

Damrongrak, I., Damrongrak, P. and Pangsuban, S. 2015. Soil properties, plant nutrient status in rubber leaf and its growth in abandoned paddy field. *Songklanakarin Journal of Plant Science*. 2(3) : 17-22.

Darunsontaya, T., Jaroenpong, C., Jindaluang, W. and Jaroenchasri, R. 2018. Potassium adsorption characteristics of sugarcane growing soils in Sa Kaeo province. *Khon Kaen Agriculture Journal*. 46(2) : 277-288.

Darunsontaya, T., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I. and Gilkes R.J. 2010. The kinetics of potassium release to sodiumtetra phenylboron solution from the clay fraction of highly weathered soils. *Applied clay science*. 50(3) : 376-385.

Darunsontaya, T., Thasanon, P., Jindaluang, W. and Poomsong, K. 2019. Kinetics of potassium release of lowland soils in central plain of Thailand. *Journal of Agriculture*. 36(1) : 123-133.

Department of Earth Science. 2011. Handbook Introduction to Soil Science. Songkhla : Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University.

Department of Land Development. 2005. Handbook for Analyzing Soil Samples, Water, Fertilizer, Soil Improvement Materials Book. Bangkok: Office of Science for Land Development.

Department of Soil Science. 2005. Introduction to soil science. Bangkok : Department of Soil Science, Kasetsart University.

- Dhaliwal, A.K., Gupta, R.K., Singh, Y. and Singh, B. 2006. Potassium fixation and release characteristics of some benchmark soil series under rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic plains of northwestern India. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 32 : 2679-2690.
- Fageria, N.K. 1992. *Maximizing Crop Yields*. New York: Marcel Dekker, JNC.
- Ge, Y., Cheng, H., Zhou, W., Zhou, H. and Wang, Y. 2022. Enhancing Zn and Cd removal from heavy metal-contaminated paddy soil using an artificial microbial consortium. *J Soils Sediments.* 22: 218-228.
- Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. *In Method of Soil Analysis Part 1.* (ed. A. Klute) pp. 383-411. Madison: Soil Science Society of American Society of Agronomy.
- Grimme, H. 1985. The dynamics of potassium in the soil-plant system. *Proceeding 19<sup>th</sup> Colloquim International Potast Inst: Potassium in the Agricultural Systems of the Humid Tropics Bangkok.* 127-154.
- Hartt, C.E. 1969. Effect of potassium deficiency upon translocation of <sup>14</sup>C in attached blades and entire plants of sugarcane. *Plant Physiology.* 45 : 183-187.
- Havlin, J.L. and Westfall, D.G. 1985. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal.* 49 : 366-370.
- Havlin, J.L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L. and Nelson, W. L. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management 7<sup>th</sup> Edition*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.



- He, J., Liu, G.L., Zhu, D.W., Cai, J.B., Zhou, W.B. and Guo, W. 2015. Sequential extraction of calcium in lake sediments for investigating the cycle of phosphorus in water environment. *Int J Environ Sci Technol.* 12 : 1123-1136.
- He, W., Zhao, W., Yang, J., Oosterhuis, D. M. Loka, D. A. and Zhou, Z. 2016. Relationship between potassium fertilization and nitrogen metabolism in the leaf subtending the cotton (*Gossypium hirsutum L.*) boll during the boll development stage. *Plant Physiology and Biochemistry.* 101 : 113-123.
- Helmke, P.A. and Sparks, L.D. 1996. Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium and Cesium. *In Method of Soil Analysis Part 3.* (eds. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soiltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Summer, M.E.) pp. 551 - 573. Madison: Soil Science Society of American Society of Agronomy.
- Hosseini-fard, J.S., Khademi, H. and Kalbasi, M. 2010. Different forms of soil potassium as affected by the age of pistachio (*Pistacia vera L.*) trees in Rafsanjan, Iran. *Geoderma.* 155 : 289-297.
- Huang, P.M. 2005. Chemistry of potassium in soils. *In Chemical processes in soils.* (eds. Tabatabai, M.A and Sparks, D.I.) pp. 227–292 Soil Science Society of America.
- Huangmee, K., Kanghae, P., Punsak, W. and Homhaul, W. 2019. The ability of potassium-solubilizing bacteria on germination of seeds Phitsanulok 2 rice under laboratory condition. *Soil and Fertilizer Journal* 41 : 48-58.
- Jackson, M.L. 1958. *Soil Chemical Analysis.* Englewood: Prentice Hall.
- Jacob, J.L., Prevot, J.C. and Kekwick, R.G.O. 1989. General metabolism of *Hevea brasiliensis* latex (with the exception of isoprenic anabolism). *In Physiology of*

- Rubber Tree Latex. (eds. d' Auzac, J., Jacob, J.L. and Chrestin, H.) pp. 101-144. Boca Raton: CRC Press.
- Jardine, P.M. and Sparks, D.L. 1984. Potassium–calcium exchange in a multi reactive soil system: I. Kinetics. *Soil Science Society of America Journal*. 48 : 39-45.
- Jones, J.B.Jr. 2001. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press: Boca Raton, Florida.
- Joseph, M., Nair, R.B., Mathew, M. and Punnoose, K.I. 1998. Potassium nutrition of mature rubber. *Indian journal of natural rubber research*. 11: 58-66.
- Kaplan, O., Kaya, G. and Yaman, M. 2011. Sequential and selective extraction of copper in different soil phases and plant parts from former industrialized area. *commun Soil Sci Plant Anal*. 42 : 2391-2401.
- Karthikakuttyamma, M., Joseph, M. and Nair, A.S.N. 2000. Soils and nutrition. *In Natural Rubber Agromanagement and Crop Processing* (eds. George, P.J. and Jacob, C.K.) pp. 70-198. Kottayam: Rubber Research Institute of India.
- Khalifa, K., Al-Chammaa, M. and Al-Ain, F. 2012. Effect of potassium fertilizers on cotton yield and nitrogen uptake efficiency in an Aridisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43 : 2180–2189.
- Kheoruenromne, I. and Vijansorn, P. 2003. *Soil Taxonomy of Thailand*. Bangkok: Kasetsart University Press.
- Kitprasong, P. 2020. Status of soils Magnesium in Southern Thailand and Development of Soils Magnesium Test Kits. The degree of Master of Science in Soil Resources Management. Prince of Songkla University.

- Kitprasong, P., Khawmee, K., Poonpakdee, C. and Onthong, J. 2020. Soil magnesium: status and ratios on potassium and calcium in economic crop planted soils of southern Thailand. *Thai Science and Technology Journal*. 29(3) : 483-497.
- Kloster, N. and Avena, M. 2015. Interaction of humic acids with soil minerals: adsorption and surface aggregation induced by  $\text{Ca}^{2+}$ . *Environ Chem*. 12(4) : 37-39.
- Kongmak, P., Khawmee, K. and Onthong, J. 2017. Status and K/Mg ratio in soil and leaves of rubber trees grown in lowland and upland areas. *Songklanakarin Journal of Plant Science*. 4(4) : 66-72.
- Krishnamurti, G.S.R., Huang, P.M., Van Rees, K.C.J., Kozak, L.M. and Rostad, H.P. 1995. Speciation of particulate-bound cadmium of soils and its bioavailability. *Analyst journal*. 120 : 659-665.
- Kungpisdan, N. 2007. Efficient Use of Fertilizers with Rubber After Opening Based on Soil Analysis. Bangkok: Rubber Research Institute, Department of Agriculture.
- Kungpisdan, N. 2008. Fertilizer Usage Based on Soil Analysis. Bangkok: Rubber Research Institute, Department of Agriculture.
- Kungpisdan, N. 2009. Sustainable Management of Rubber Plantations. Bangkok: Rubber Research Institute, Department of Agriculture.
- Kungpisdan, N. 2011. Recommend of the use rubber fertilizer. Bangkok: Rubber Research Institute, Department of Agriculture.
- Land Development Department. 2023. Characterization of established soil series properties in peninsular and Southeast coast region of Thailand. Available online at [https://www.ddd.go.th/thaisoils\\_museum/knownlg/series\\_S.htm](https://www.ddd.go.th/thaisoils_museum/knownlg/series_S.htm) (verified on January 5, 2023).

- Li, T., Wang, H., Wang, J., Zhou, Z. and Zhou, J. 2015. Exploring the potential of phyllosilicate minerals as potassium fertilizers using sodium tetraphenylboron and intensive cropping with perennial ryegrass. *Scientific Reports*. 5 : 1-7.
- Li, C., Zhao, X., Liu, X., Lu, D., Chen, X., Wang, H. and Zhou, J. 2020. Rice and wheat yield and soil potassium changes in response to potassium management in two soil types. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 117 : 121-130.
- Loide, V. 2004. About the effect of the contents and ratios of soil's available calcium, potassium and magnesium in liming of acid soils. *Agronomy Research*. 2(1) : 71-82.
- Malavolta, E. 1985. Potassium status of tropical and subtropical regions soils. *In Potassium in Agriculture*. pp. 163-200. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America.
- Manning, D. V., Joana, B., Mallely, S.L. and Kirsten B. 2017. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the Total Environment*. 574 : 476-481.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. London: Academic Press.
- Martin, J., Overstreet, C.R. and Hoagland, D.R. 1946. Potassium fixation in soils in replaceable and nonreplaceable forms in relation to chemical reaction in the soil. *Soil Science Society of America Journal*: 94-101.
- McLean, F.O. and Watson, M.E. 1985. Soil measurements of plant available potassium. *In Potassium in Agriculture* (ed. Munson, R.D.) pp. 277-308. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America.

- Mohammed, S.O.M., Brandt, K., Gray, N.D., Whit, M.L. and Manning, D.A.C. 2014. Comparison of silicate minerals as sources of potassium for plant nutrition in sandy soil. *European Journal of Soil Science*. 65 : 653-662.
- Mueller, B. 2015. Experimental interactions between clay minerals and bacteria. *Pedosphere Journal*. 25 : 799–810.
- Najafi, G. M. and Abtahi, A. 2012. Factors affecting potassium fixation in calcareous soils of southern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 58(5) : 335–352.
- Najafi-Ghiri, M., Abtahi, A., Owliaie, H., Hashemi, S.S. and Koohkan, H. 2011. Factors affecting potassium pools distribution in calcareous soils of southern Iran. *Arid Land Res Manag*. 25 :313–327.
- Najafi-Ghiri, M., Rezabigi, S., Hosseini, S., Boostani, R.H. and Owliaie, R.H. 2018. Potassium fixation of some calcareous soils after short term extraction with different solutions. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 65 : 1-31.
- Nemati, K., Bakar, N.K.A., Abas, M.R. and Sobhanzadeh, E. 2011. Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia. *J Hazard Mater*. 192: 402-410.
- Ntlopo, K. Z., Onthong, J. and Poonpakdee, C. 2022. Magnesium fractionation in different textural groups and commercial crop cultivations of Thai soils. *Science Asia*. 48 : 223-230.
- Oenema, O., Kros, H. and Vries, W. 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *Europ. J. Agronomy*. 20 : 3-16.

- Office of Agricultural Economics. 2020. Agricultural Statistics of Thailand 2018. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- Office of Agricultural Economics. 2021. Agricultural Statistics of Thailand 2021. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- Onthong, J. and Osaki, M. 2006. Adaptations of tropical plants to acid soils. *Tropics*. 15(4) : 337-347.
- Onthong, J. and Poonpakdee, C. 2020. Soil and Plant Analysis Guide, Department of Earth Science. Songkhla: Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University.
- Osotsapa, Y. 2015. Plant Nutrition. Bangkok: Kasetsart University Press.
- Pasane, C., Tawornpruek, S. and Wiriyakitnateeku, W. 2019. Potential and suitability of rubber growing soils in Khon Kaen province. *King Mongkut's Agricultural Journal*. 37: 489-497.
- Pongthai, T., Onthong, J. and Khawmee, K. 2017. Effect of magnesium on nutrient concentration and growth of rubber tree sapling. *Journal of Agricultural Research and Extension*. 34(1) : 1-12.
- Poonpakdee, C. 2013. Status of Potassium in Upland and Lowland Rubber Growing Soils in Songkhla Province. The degree of Master of Science in Soil Resources Management. Prince of Songkla University.
- Poonpakdee, C., Onthong, J., Khwunta, K. and Duangthong, S. 2013. Potassium forms in upland and lowland rubber growing soils in Songkhla Province. *Khon Kaen Agric J*. 41: 21-32.

- Poonpakdee, C., Tzeng, J.H., Weng, C.H. and Lin, Y.T. 2018. Assessment of potassium speciation in soil using traditional single leaching and modified sequential extraction processes. *J Soils Sediments*. 18: 610-623.
- Poovarodom, S. and Boonplang, N. 2014. Calcium: an important nutrient in fruit production. *Thai journal of soils and fertilizers*. 36 (1-4) : 13-26.
- Pottosin, I. and Dobrovinskaya, O. 2014. Non-selective cation channels in plasma and vacuolar membranes and their contribution to K<sup>+</sup> transport. *J Plant Physiol*. 171: 732-742.
- Pratt, P.F. 1965. Potassium. *In Methods of Soil Analysis: Part 2– Chemical and Microbiological Properties*. (ed. Black, C.A.) pp. 1023–1031. Madison: American Society of Agronomy.
- Purwanto, O. D. and Sudradjat. 2020. Determination of optimum rate of phosphorus and potassium fertilizers for a four-year-old oil palm (*Elaeis guineensis Jacq.*). *Earth and Environmental Science*. 418 : 1-9.
- Pushparajah, E. and Sharifuddin, H.A.H. 1981. Potassium in rubber cultivation. *Proceeding of the International Conference on: Phosphorus and Potassium in the Tropics*. Held in Kuala Lumpur, 17-19 August 1981, pp 590.
- Rao, C.S., Rao, A.S., Rao, K.V., Venkateswarlu B. and Singh, A.K. 2010. Categorisation of districts based on nonexchangeable potassium: implications in efficient K fertility management in Indian agriculture. *Indian Journal of Fertilisers*. 6(7): 40-54.

Rubber Division. 2015. Thailand Rubber Statistics. Rubber division. Bangkok:

Department of Agriculture.

Rubber Research Institute. 2018. Academic Information of Rubber in 2018. Bangkok:

Rubber Research Institute Department of Agriculture.

Rubber Research Institute. 2011. Recommendation of Rubber Fertilizer Application in

2011. Bangkok: Department of Agriculture.

Saeteaw, W., Onthong, J. and Khawmee, K. 2020. Soil properties and organic carbon composition using infrared techniques in rubber growing soil under different rubber-based intercrops. Thai Science and Technology Journal. 29(5) : 880-892.

Saeteng, P., Onthong, J. and Khawmee, K. 2022. Nutrient status in rubber growing soil, rubber leaf and nutrient concentration in latex under different rubber-based intercropping plantation. J Appl Sci. 22: 1-7.

Saleque, M.A., Anisuzzaman, M. and Moslehuddin, A.Z.M. 2009. Quantity–intensity relationships and potassium buffering capacity of four Ganges river floodplain soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 40 : 1333-1349.

Sanputawong, S., Chansathean, K., Peakchantuk, N. and Chuiruy, C. 2017. Study of proper fertilizer management on growth and yield of oil palm (*Eleais guineensis Jacq.*). International Journal of Agricultural Technology. 13(7) : 2631-2639.

Shakeri, S. and Abtahi, A. 2019. Potassium fixation capacity of some highly calcareous soils as a function of clay minerals and alternately wetting-drying. Archives of Agronomy and Soil Science : 445-457.



- Simonsson, M., Andersson, S., Andrist-Rangel, Y., Hillier, S., Mattsson, L. and Oborn, I. 2007. Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. *Geoderma*. 140 : 188-198.
- Singh, M., Singh, V.P. and Reddy, D.R. 2002. Potassium balance and release kinetics under continuous rice–wheat cropping system in Vertisol. *Field Crop Res.* 77 : 81-91.
- Sirichomchun, S. 2009. Revising Methods of Estimating K Fertilizer Requirements on Smectitic Maize Soils. Master of Science (Soil Science), Department of Soil Science, Kasetsart University.
- Sparks, D.L. 2000. Bioavailability of soil potassium. *In Handbook of Soil Science*. Boca Raton: CRC Press.
- Sparks, D.L. and Huang, P.M. 1985. Physical chemistry of soil potassium. *In Potassium in Agriculture* pp. 201-276. U.S.A.: American Society of Agronomy.
- Sparks, D.L., Zelazny, L.W. and Martens, D.C. 1980. Kinetics of potassium desorption in soil using miscible displacement. *Soil Science Society of America Journal*. 44: 1205-1208.
- Sposito, G. 2008. *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press.
- Steiner, F., Pivetta, L.A., Castoldi, G., Costa, M.S.S.M. and Costa, L.A.M. 2020. Phosphorus and potassium balance in soil under crop rotation and fertilization. *Semina: Ciências Agrárias*. 33(6) : 2173-2186.

- Suchartgul, P. 2021. Fertilizer Usage Based on Soil Analysis. Bangkok : Rubber Research Institute, Department of Agriculture.
- Suddhiprakarn, A. 2010. Minerals of Clay Sized Particles of Tropical Soils. Bangkok : Department of Soil Science, Kasetsart University.
- Surawanit, S. 2011. Potential land suitable for rubber planting in Ratchaburi and Prachinburi provinces. Para Rubber Bulletin. 6 : 32-40.
- Suttanukool, P., Darunsontaya, T. and Jindaluang, W. 2019. A study on the quantity/intensity relationships of potassium of sugarcane growing soils eastern Thailand. Communications in soil science and plant analysis. 50(2) : 153–163.
- Suwanarit, A. 1981. Potassium Calcium Magnesium and Sulfer on the Fertility of the Soil, Soil and Fertilizer Technology Research and Introduction Project Academic Document No. 8. Bangkok: Kasetsart University.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedure for the Speciation of particulate trace metals. Anal Chem. 51: 844–850.
- Thasanon, P., Darunsontaya, T., Jindaluang, W. and Khongkaew, C. 2018. Forms of potassium in paddy soils central plain of Thailand. Songklanakarin Journal of Plant Science. 5: 58-66.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. *In* Methods of Soil Analysis Part 2 : Chemical and Microbiological Properties. (ed. Page, A.L.) pp. 159-165. Madison: American Society of Agronomy.

- Tuma, J., Skalický, M., Tumová, L., Bláhová, P. and Rosulková, M. 2004. Potassium, magnesium and calcium content in individual parts of *Phaseolus vulgaris* L. plant as related to potassium and magnesium nutrition. *Plant soil environ.* 50(1) : 18-26.
- Van Raij, B. 1998. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29 : 1553–1570.
- Vityakon, P. 2004. Potassium in soil *In* *Advanced Soil Fertility* 2<sup>nd</sup> edition (revised) pp. 179-211. Khonkean: Department Land Resources and Environment Faculty of Agriculture, Khon Kaen University.
- Wang, J.G., Zhang, F.S., Cao, Y.P. and Zhang, X.L. 2000. Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. *Nutr Cycl Agroecosys.* 56 : 37-43.
- Wang, F.L. and Huang, P.M. 2001. Effects of organic matter on the rate of potassium adsorption by soils. *Canadian Journal of Soil Science.* 81 : 325-330.
- Wattanawangjongsuk, C., Khunthong, S. and Nimnualrat, K. 2020. Effect of potassium fertilizers on calcium and magnesium levels in soil and turmeric leaf. *Journal of Agri Research & Extension.* 39(3) : 24-39.
- Weed, S.B., Davey, C.B. and Cook, M.G. 1969. Weathering of mica by fungi. *Soil Science Society of America Journal Proc.* 33: 702-706.
- Whitting, L.D. 1965. X-ray diffraction techniques for mineral identification and mineralogical. *In* *Method of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling.* (eds. Black, C.A.,

Evans, D.D., Ensminger, L.E., White, J.L., Clark, F.E. and Dinauer, R.C.) pp. 671-696. Madison: Soil Science Society of American Society of Agronomy.

Wiriyakitnateekul, W. 2016. Potential of sandy soils for rubber tree plantations in Northeast Thailand. Bangkok: Office of science for land development.

Wiwutvongvana, P. 2003. Soil Chemistry. Chiangmai: Chiangmai pimsuay ltd., part.

Yingjajaval, S. and Bangjan, J. 2006. Major plant nutrient contents in para rubber (RRIM 600). Agricultural Science Journal. 37(4) : 353-364.

Zörb, C., Senbayram, M. and Peiter, E. 2014. Potassium in agriculture-status and perspectives. J Plant Physiol. 171: 656-669.

