



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการนวัตกรรมเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืช
และปุ๋ยละลายช้า

A Novel Clay Pellet for Planting Materials and
Slow-Release Fertilizer

โดย ผศ.ดร.บุญจรัตน์ โจลานันท์ และคณะ

มีนาคม 2556



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการนวัตกรรมเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืช
และปุ๋ยละลายช้า

A Novel Clay Pellet for Planting Materials and
Slow-Release Fertilizer

โดย ผศ.ดร.บัญญัติรัตน์ โจ้ลานันท์ และคณะ

มีนาคม 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการนวัตกรรมเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืช
และปุ๋ยละลายช้า

A Novel Clay Pellet for Planting Materials and
Slow-Release Fertilizer

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- ผศ.ดร.บุญรัตน์ โจลนันทน์
- นางนรเทพ พลวนิช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

In order to develop novel clay pellets as a planting material with high porosity, high moisture retention, light weight, convenience for using, reusable with low cost, and to optimize the efficiency of chemical fertilizer use, the objective of this study is to develop novel clay pellets from local materials as a planting material and using as a medium for a slow-release fertilizer. The conditions of the mixing formula, the suitable application of the clay pellets as an alternative slow-release fertilizer were also studied.

The development of clay pellets as a planting material and slow-release fertilizer

The clay pellets were developed from the local raw materials and the refuse materials which included China clay, diatomite, and sawdust. The study for the suitable clay pellet production formula was carried out by the evaluation of physical, chemical, and structural properties of the clay pellets. The cost for the clay pellet production was also evaluated.

- 1) The clay pellets producing from three raw materials (China clay, diatomite, and saw dust) can be developed and applied as a planting material. It was not necessary to add any binder during the combustion process at 750°C (combustion at low temperature resulted in high porosity and high water absorption capability). By using machine, the suitable shape for industrial production of the clay pellet is the cube shape which it can be produced in a large quantity and it is a simple production process. The estimation cost of the clay pellet production in cube shape (raw material, depletion, electricity, and labour) was 0.4-0.5 baht/kg.
- 2) From the study of 15 mixture formula of raw materials (China clay : diatomite : sawdust), the most two suitable mixture formula for the production of clay pellet in this study were 25:60:15 (formula 3) and 40:45:15 (formula 6). Additionally, it was found that the mixture formula with sawdust higher than 30% resulted in a cracking and breaking of most of the clay pellets after combustion. Meanwhile, the clay pellet containing sawdust higher than 15%, the compressive strength of the clay pellets was reduced for 43-66%, thus the mixing formula has a significant effect on the properties of the clay pellets.
- 3) The size of the cube shape clay pellets producing from formula 3 and 6 were 0.5x0.5x0.5 cm and 1.0x1.0x1.0 cm, respectively. It has suitable properties for using as a planting material according to assigned criteria (Table 3.2). Generally, the clay pellets should meet with the following criteria, neutral pH (7.1 ± 0.19 - 7.7 ± 0.13), low to moderate Cation-Exchange Capacity (CEC) (13.17 ± 0.09 - 17.27 ± 0.01 cmol(e)/kg), low specific density (1.5 ± 0.71 - 1.6 ± 0.35 g/cm³), light weight,

good water absorption capability ($63\pm2.56\%-73\pm1.23\%$), low water solubility ($0.05\pm0.06\%$), high compressive strength ($11,296.00\pm21.10-13,275.00\pm65.98 \text{ kg/cm}^3$), and can be reusable easily. When compare with perlite, it was found that density of perlite is very low ($0.07\pm0.14 \text{ g/cm}^3$) so it is lighter and has better water absorption capability than the developed clay pellet. However, due to its high water absorption capability ($231\pm0.71\%$), perlite is very soluble in water which it cannot be reused.

- 4) The clay pellets produced from formula 3 and 6 have almost identical chemical properties. The major compositions included 72.379-73.716% of Silica (SiO_2), 12.708-13.529% of Alumina (Al_2O_3) and 7.23-9.561% of Ferric Oxide (Fe_2O_3). The results of heavy metal analysis indicated that the clay pellets produced under formula 3 and 6 can be safely applied as planting material and it is not toxic to the plants. Furthermore, the clay pellet produced according to formula 3 has higher porosity than formula 6 as a result the density of formula 3 (1.70) is lower than formula 6 (2.03), and its specific surface area is higher for 1.5 times which it is corresponding to the result of morphological analysis of the clay pellets by Scanning Electron Microscopy.
- 5) The clay pellets produced from both formula and sizes which had been prepared with 10% urea solution contained higher total nitrogen (TN) for approximately 36-43 times (increased from originally 0.06-0.07% to 2.57-2.79%). When the effect of drying process on TN value was investigated, it was found that drying at room temperature (TN = 1.78-2.00%) resulted in a significantly ($P<0.05$) lower TN content than drying at $75\pm5^\circ\text{C}$ (TN = 2.17-2.45%) for 16-22% under every testing condition. However, the study found that the different drying condition did not cause a significant difference ($P<0.05$) in NO_3^- -N content in the clay pellets. Drying the clay pellets at $75\pm5^\circ\text{C}$ resulted in a significant ($P<0.05$) lower moisture content in both formula 3 and 6 than drying the clay pellets at room temperature for 10-18%.

Clay Pellets under Leaching Process

Both sizes of clay pellets ($0.5\times0.5\times0.5 \text{ cm}$ and $1.0\times1.0\times1.0 \text{ cm}$) produced from formula 3 and 6 were tested by leaching with distilled water (DI) and synthesis soil solution, and then the leachate was monitored for the changing in pH, electrical conductivity (EC), and total nitrogen (TN). The clay pellets then were studied in comparison with Osmocote and urea fertilizer. The results were summarized as follows:

- 1) Changes of pH: The starting pH of DI water and synthesis soil solution was 7.05 and 6.62, respectively. The pH of the leachate of Osmocote and urea fertilizer was compared. It was found that pH of the leachate of urea fertilizer was in alkaline condition (pH 8-9) for the first 24 hours, after that there was a rapid decrease in pH to lower than pH in leachate of clay pellets. The pH of the leachate of the clay pellet was slightly acidic to neutral (pH 4.5-7.7) throughout the study period. Meanwhile pH of leachate of Osmocote in the first 24 hour was in quite acidic (pH 4-5), after that the pH was increased with an increase in experiment period. However, after finished testing (720 hours or 1 month), pH in leachate of clay pellet was still in suitable range for plantation (pH 5.42-6.73), while the pH in leachate of Osmocote and urea fertilizer was 5.53-5.379 and 5.25-5.98, respectively. The major factors that had significant effect on the changing of pH were the mixture formula of the clay pellets and the type of solution used for leaching.
- 2) Changes of Electrical Conductivity (EC): The starting EC of DI water and synthesis soil solution was 4.98 μ S/cm and 2.54 μ S/cm, respectively. After testing, it was found that the EC in leachate of Osmocote and urea fertilizer was decreased with an increase in experiment period. However, the EC in leachate of Osmocote was very high at the beginning to the middle of the testing (1-14 μ S/cm), and it was significantly difference with the clay pellets and urea fertilizer ($P < 0.05$). Moreover, the EC in the DI water and synthesis soil solution after leaching the clay pellets and urea fertilizer was within the level of having small effect on plantation. Thus the clay pellets produced from China clay and diatomite which had inert property, low electrical conductivity, prepared according to formula 3 and 6 is safe for using as alternative planting material. Meanwhile, under condition of leaching the clay pellets with DI water and synthesis soil solution was found to have a very small effect on the nutrient uptake and the toxicity of the plants from the leachate salts. The major factors that have significant effect on the changing of EC in the leachate were the mixture formula, size of the clay pellets, and type of solution used for leaching.
- 3) Changing of total nitrogen (TN): The changing of TN in clay pellets and Osmocote was found to occur very rapidly in the first 24 hours of the testing. The accumulated TN in the leachate was as high as $64.60 \pm 7.307 - 83.68 \pm 7.112\%$ of the starting TN. The TN in the leachate of Osmocote in the first 24 hours of the testing was very low (0.1-0.2%) when compared with the starting TN (TN $\approx 13\%$). However, there was a constant release of TN from the Osmocote throughout the experiment period (1 month) for both leaching with DI water and synthesis soil

solution with the TN content of 60-500 mg/kg. It was found that the clay pellets produced from materials that had been modified with 10% urea solution did not meet with European standard for slow-release fertilizer and American and Japan standard for controlled-release fertilizer where the accumulated content of the released N should not exceed 15% and 40% at 24 hours, respectively. However, the content of TN from the leachate of clay pellet was slower than from urea fertilizer which it has 100% solubility. The major factors that had a significant effect on the changing of TN were mixture formula, size of the clay pellet, the leachate solution, and drying temperature.

Clay Pellets under Soil Incubation Test

The changing of physical properties, chemical properties, and the dynamic change of nitrogen of clay pellets was tested under different soil incubation condition for a period of 4 weeks. The test was compared between the both sizes for clay pellets (0.5x0.5x0.5 cm, and 1.0x1.0x1.0 cm) produced from formula 3 and 6, and under drying temperature of $75\pm 5^{\circ}\text{C}$. The results of testing of clay pellets were compared with urea fertilizer.

- 1) Physical and chemical properties of the soil: The soil used for this study was loamy sand (Sansai, Group no. 22) which it is a mixture of soil and sand. The soil was not very fertile (OM = 2.24%) and it contained sand and clay for approximately 75%. The soil was brownish grey, neutral (pH 5.36), low salt content ($\text{EC} < 400 \mu\text{S}/\text{cm}$), and the electrical conductivity is neutral ($\text{CEC} = 22.69 \text{ cmol}(\text{e})/\text{kg}$).
- 2) Changes of moisture content: Before testing, the soil was prepared by adjusting the moisture content to a suitable content. The starting moisture content of the soil was 13-14%, and after the clay pellets were prepared the moisture content was decreased to 4-5% due to the moisture had been absorbed by the clay pellets. Throughout the study, it was found that every testing condition of the clay pellets (except the control condition), there was a constant release of urea and there was an enhancement of mineralization, as a result there was a balance in moisture content more than the control condition. There was no significant difference in the moisture content in week 2-4 of the testing, whereas the moisture content in the control condition was easily lost to the environment more than other testing conditions. The factor that had a significant effect on the changing of moisture content in the soil was the mixture formula of the clay pellets.

- 3) Changes of pH: It was found that in every testing condition (except the control condition), there was a rapid increase in pH within week 1 of the testing, and then it was stabilized in the range of 8.33 ± 0.01 - 8.69 ± 0.03 until the end of the experiment (1 month). It was indicating that there was a continuously mineralization of urea fertilizer throughout the experiment. Statistically, there were no factors that had a significant effect on the changing of the pH. However, the pH from this experiment was quite in the basic range where the pH of the soil that is suitable for microbiological decomposing and plantation is 6.5-7.8. Thus it may take a longer time for the mineralization process in order to lower the pH to a stabilized stage.
- 4) Changes of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$): In every testing condition of the clay pellet (except the control condition), there was a mineralization of urea fertilizer to $\text{NH}_3^+\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, as a result there was a rapid increase in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and pH. A decrease in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ with an increase in the incubation time in every testing condition could be a result from the lost of nitrogen in the form of $\text{NH}_3^+\text{-N}$ from the mineralization process and under low moisture content (10-15%) and the oxidization of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ to $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$. The result indicated that the preparation of clay pellets by using 10% urea solution can be applied as a medium for the slow-release of nutrient without having any toxic effect on the plant, as well as using as a source of nitrogen which sufficiently release nitrogen containing compounds into the soil ($\text{NH}_4^+\text{-N} = 200\text{-}400 \text{ mg/kg}$).
- 5) Changes of Nitrate-Nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$): After the incubation of the soil for 1 month, it was found that there was no significant difference in the concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in every testing condition (Exp-1 to Exp-6). The concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was quite low ($<10 \text{ mg/kg}$) and varied in the range of 1.5-2.4 mg/kg. This could be a result of low moisture content (9-15%) which it caused a low mineralization. Thus to use clay pellets as a medium for the release of nutrients into the soil, the adjustment of moisture content should be a primary concern since some moisture content will be absorbed in the clay pellets.
- 6) Changes of organic matters: Since urea was used as the source of nutrient in this study, there is no significant effect on the changing of organic matters in the soil (week 1-4). As a result, the organic matters in the soils were very stable and very similar to the organic matters in the soil used for the testing (2.24%).

- 7) Changes of total nitrogen (TN) content in the clay pellets: A decrease in the content of TN in the clay pellets in every testing condition indicated that there was a release of urea fertilizer from the clay pellets into the environment which it was corresponding to the increase in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in the soil. The clay pellets were continuously and slowly releasing urea after week 1 until the end of testing (week 2-4). Thus the changing of TN in the clay pellets in every testing condition was very similar and there was no significant difference. Additionally, the TN content in clay pellets after the end of the testing was remained at 1,100 – 1,670 mg/kg which it was higher than the control condition for 5.5-8.4 times. Hence, this testing indicated that the clay pellets that were produced from urea fertilizer can be applied as a medium for a slow-release of nutrients at a certain level, especially in the week 2 until the end of the testing.

Applications

- 1) The suitable mixture formula for this study were formula 3 and 6, however when taking the production process into the consideration as well as using for a commercial purpose, this research recommended the mixture formula for China Clay : Diatomite : Sawdust at 25:60:15 (formula 3). The clay pellets produced according to formula 3 has higher porosity property, specific surface area, and porosity volume than formula 6. These physical properties have effect on the leachate process and the release of nitrogen containing compounds into soil from amended urea fertilizer in the clay pellets. Additionally, the cost of the production and the transportation for clay pellets produced according to formula 3 is lower than formula 6. The clay pellets produced from formula 3 has lower specific density than formula 6 thus the transportation cost should be lower due to its lower mass.
- 2) The developed clay pellets have all properties for being used as a planting material and it can be applied as a medium for the slow-release of nutrients. Thus a further study for the real use of the clay pellets as a planting material should be carried out.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย นวัตกรรมเมล็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า สำเร็จลงได้ภายใต้การสนับสนุนทุนวิจัยโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายเกษตร ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่กรุณาให้ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะ อันเป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความร่วมมือในทุกด้านรวมทั้งการอนุเคราะห์เอื้ออำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานจนโครงการวิจัยแล้วเสร็จ

คณะผู้วิจัย

Abstract

In order to create knowledge and develop alternative technology for planting material and slow-release fertilizer with low cost materials, the objective of this research is to develop novel clay pellets from local materials (China clay, diatomite, and sawdust) as a planting material and using as a medium for a slow-release fertilizer. The research was done by dividing into four phases. Phase 1 and Phase 2 studies included preparations and analyzes of raw materials, clay pellet productions, studies of clay pellet mixture formula (15 mixture formula, triangle formula), shapes (cube and sphere), sizes, and cost, as well as evaluations (physical, chemical, and structural properties) of the developed clay pellet to determine an optimal condition for using as planting material and slow-release fertilizer. Phase 3 trial was conducted to examine chemical properties and contents under leaching of impregnated urea (conc. 10%) into clay pellet and to investigate release patterns of N at different test conditions (temperatures; $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ and ambient, leaching solutions; distill (DI) water and synthesis soil solution, fertilizers; Osmocot and urea) of leaching laboratory. Phase 4 was also carried out to determine the effect of impregnated urea (conc. 10%) into clay pellet on N dynamics by soil (Sansai loamy sand, Group no. 22) incubation test. Means and standard deviations were reported. Samples were also tested for statistical significance by the analyses of variance (ANOVA) and least significant differences (LSD) at $\alpha = 0.05$.

Results revealed the most two suitable mixture formula for the production of clay pellet in this study were China clay: diatomite: sawdust of 25:60:15 (formula 3) and 40:45:15 (formula 6). By using machine, the suitable shape for industrial production of the clay pellet is the cube shape with an estimation cost of the clay pellet production in cube shape was 0.4-0.5 baht/kg. The size of the cube shape clay pellets producing from formula 3 and 6 were $0.5\times 0.5\times 0.5$ cm and $1.0\times 1.0\times 1.0$ cm, respectively. It has suitable properties for using as a planting material according to assigned criteria with the following criteria, neutral pH (7.1 ± 0.19 - 7.7 ± 0.13), low to moderate Cation-Exchange Capacity (CEC) (13.17 ± 0.09 - 17.27 ± 0.01 cmol(e)/kg), low specific density (1.5 ± 0.71 - 1.6 ± 0.35 g/cm³), light weight, good water absorption capability ($63\pm 2.56\%$ - $73\pm 1.23\%$), low water solubility ($0.05\pm 0.06\%$), high compressive strength ($11,296.00\pm 21.10$ - $13,275.00\pm 65.98$ kg/cm³). The major compositions included 72.379-73.716% of Silica (SiO₂), 12.708-13.529% of Alumina (Al₂O₃) and 7.23-9.561% of Ferric Oxide (Fe₂O₃). The results of heavy metal analysis indicated that the clay pellets produced under formula 3 and 6 can be safely applied as planting material and it is not toxic to the plants. The clay pellets produced from both formula and sizes which had been prepared with 10% urea solution contained total

nitrogen (TN) for approximately 2.57-2.79%. When the effect of drying process on TN value was investigated, it was found that drying at room temperature (TN = 1.78-2.00%) resulted in a significantly ($P<0.05$) lower TN content than drying at $75\pm5^{\circ}\text{C}$ (TN = 2.17-2.45%) for 16-22% under every testing condition. However, the study found that the different drying condition did not cause a significant difference ($P<0.05$) in NO_3^- -N content in the clay pellets but resulted in a significant ($P<0.05$) moisture content between treatments.

Results of leaching test were found that the pH of the leachate of urea fertilizer was in alkaline condition (pH 8-9) for the first 24 hours and the pH of the leachate of the clay pellet was slightly acidic to neutral (pH 4.5-7.7) throughout the study period. Meanwhile pH of leachate of Osmocote in the first 24 hour was in quite acidic (pH 4-5), after that the pH was increased with an increase in experiment period. After finished testing (720 hours or 1 month), pH in leachate of clay pellet, Osmocote and urea fertilizer was 5.42-6.73, 5.53-5.79 and 5.25-5.98, respectively. The major factors that had significant effect on the changing of pH were the mixture formula of the clay pellets and the type of solution used for leaching. The electrical conductivity (EC) in leachate of Osmocote was very high ($1\text{-}14\ \mu\text{S}/\text{cm}$) at the beginning of the testing, and it was significantly difference with the clay pellets and urea fertilizer ($P<0.05$). Moreover, the EC in the DI water and synthesis soil solution after leaching the clay pellets and urea fertilizer was within the level of non effect (non-saline $<400\ \mu\text{S}/\text{cm}$, $0.4\ \text{mS}/\text{cm}$) to having small effect (very slightly saline $400\text{-}800\ \mu\text{S}/\text{cm}$) on plantation. The major factors that have significant effect on the changing of EC in the leachate were the mixture formula, size of the clay pellets, and type of solution used for leaching. The accumulated TN in the leachate of all clay pellet experiments was as high as $64.60\pm7.307\text{-}83.68\pm7.112\%$ of the starting TN. On the contrary, there was a constant release of TN from the Osmocote throughout the experiment period (1 month) for both leaching with DI water and synthesis soil solution with the TN content of 60-500 mg/kg. It was found that the clay pellets produced from materials that had been modified with 10% urea solution did not meet with European standard for slow-release fertilizer and American and Japan standard for controlled-release fertilizer. However, the content of TN from the leachate of clay pellet was slower than from urea fertilizer which it has 100% solubility. The major factors that had a significant effect on the changing of TN were mixture formula, size of the clay pellet, the leachate solution, and drying temperature.

Results of soil incubation test indicated starting moisture content of soil was decreased to 4-5% after the clay pellets were amended. It was found that every testing condition of the clay pellets (except the control condition), there was a constant release

of urea and there was an enhancement of mineralization, as a result there was a balance in moisture content more than the control condition (unmodified with urea). The factor that had a significant effect on the changing of moisture content in the soil was the mixture formula of the clay pellets. It was found that in every testing condition (except the control condition), there was a rapid increase in pH (8-9) and (200-400 mg/kg) within week 1 of the testing, until the end of the experiment (1 month). The factor that had a significant effect on the changing of NH_4^+ -N contents in the soil was the sizes of the clay pellets. Throughout the study, there was no significant effect ($P>0.05$) on the changing of NO_4^+ -N contents (1.5-2.4 mg/kg) and organic matters in the soil (week 1-4) and the TN content in clay pellets after the end of the testing was remained at 1,100–1,670 mg/kg which it was higher than the control condition for 5.5-8.4 times.

บทคัดย่อ

ด้วยความต้องการสร้างองค์ความรู้และพัฒนาทางเลือกใหม่ด้านการเกษตร สำหรับเทคโนโลยีวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้าภายใต้ต้นทุนที่ต่ำ โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาวัสดุเม็ดลูกดินจากวัสดุธรรมชาติในท้องถิ่น ได้แก่ ดินขาว ไตอะโทไมท์ และซีลี้อย สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกพืช และทำหน้าที่เป็นตัวกลางปลดปล่อยธาตุอาหารเหมือนปุ๋ยละลายช้า แผนการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 4 ระยะหลัก คือ ระยะที่ 1) การพัฒนาและผลิตเม็ดลูกดินโดยศึกษารูปแบบ สูตรผสม และขนาดที่เหมาะสมของเม็ดลูกดิน ระยะที่ 2) การศึกษาสูตรการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุปลูกพืช โดยทำการวิเคราะห์และประเมินลักษณะสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางกล ระยะที่ 3) การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการชะล้าง โดยการเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากเม็ดลูกดินด้วยสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการทำให้แห้งที่แตกต่างกัน (อุณหภูมิห้อง/ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$) และทำการเปรียบเทียบภายใต้สภาวะการชะล้างด้วยน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์ ทั้งชุดการทดลองของเม็ดลูกดิน Osmocote และปุ๋ยยูเรีย และระยะที่ 4) การศึกษาพลวัตการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ในดิน ภายใต้สภาวะการบ่มดิน (ชุดดินสนทราย) โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองของเม็ดลูกดิน (modified and unmodified with urea) และปุ๋ยยูเรีย การศึกษาจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลค่าทางสถิติและการทดสอบสมมติฐานปัจจัยโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญทางด้านสถิติที่ 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95

ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบ สูตรผสม และขนาดที่เหมาะสมของเม็ดลูกดิน คือ รูปแบบท่อนลูกบาศก์ ขนาด $0.5\times 0.5\times 0.5\text{ cm}^3$ และ $1\times 1\times 1\text{ cm}^3$ (2 ขนาด) และสูตรผสม (2 สูตร) ดินขาว: ไตอะโทไมท์: ซีลี้อย เท่ากับ 25:60:15 และ 40:45:15 โดยมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกตามเกณฑ์ที่กำหนด คือ มีค่า pH เป็นกลาง (7.1 ± 0.19 - 7.7 ± 0.13) ค่าความจุหรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ต่ำ-ปานกลาง (13.17 ± 0.09 - $17.27\pm 0.01\text{ cmol/kg}$) ค่าความหนาแน่นต่ำ (1.5 ± 0.71 - $1.6\pm 0.35\text{ g/cc}$) มีน้ำหนักเบา อุ่มน้ำหรือดูดซึมน้ำได้ดี ($63\%\pm 2.56$ - $73\%\pm 1.23$) ไม่ยุ่ยตัวในน้ำ ($0.05\pm 0.06\%$) และมีความแข็งหรือความคงตัวสูง ($11,296\pm 21.10$ - $13,275\pm 65.98\text{ kg/cm}^2$) สำหรับค่าใช้จ่ายในการผลิตเม็ดลูกดินชนิดท่อนลูกบาศก์อยู่ที่ประมาณ 0.4-0.5 บาท/กิโลกรัม นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเม็ดลูกดินทั้งสองสูตรมีปริมาณองค์ประกอบหลักที่พบ ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และ สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 72.4-73.7, 12.7-13.5, และ 7.2-9.6 และผลทดสอบการชะโลหะหนัก บ่งชี้ว่าเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้นสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกได้อย่างปลอดภัยและไม่ส่งผลเป็นพิษต่อพืช สำหรับการเตรียมเม็ดลูกดิน (ทั้งสองสูตรและสองขนาด) ด้วยสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 พบว่าเม็ดลูกดินมีค่า TN อยู่ในช่วงร้อยละ 2.57-2.79 เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกัน พบว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ($\text{TN}=1.78$ - 2.00%) ส่งผลให้ค่า TN มีค่าต่ำกว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($\text{TN}=2.17$ - 2.45%) อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ถึงร้อยละ 16-22 อย่างไรก็ตามค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ในเม็ดลูกดิน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) แต่มีผลให้ค่าความชื้นของเม็ดลูกดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ถึงร้อยละ 10-18

ผลการทดสอบภายใต้สภาวะการชะล้างพบว่า ค่า pH ในน้ำชะของปุ๋ยยูเรียจะมีค่าค่อนข้างเป็นด่าง (8-9) ในช่วง 24 ชั่วโมงแรก กรณีของชุดการทดลองเม็ดลูกดินพบว่าค่า pH โดยส่วนใหญ่มีค่าค่อนข้างเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลาง (4.5-7.7) ตลอดการทดสอบ ขณะที่ค่า pH ในน้ำชะของ Osmocote ในช่วง 24

ชั่วโมงแรกของการทดสอบพบว่ามีความเข้มข้นเป็นกรด (4-5) ที่สิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมง) ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดิน Osmocote และปุ๋ยยูเรียอยู่ในช่วง 5.42-6.73, 5.53-5.79 และ 5.25-5.98 ตามลำดับ สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ได้แก่ สูตรผสมเม็ดลูกดินและชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า (EC) พบว่าเฉพาะเงื่อนไขของ Osmocote ค่า EC ในน้ำชะมีความเข้มข้นสูงมากในช่วงแรก (1-14 mS/cm) และแตกต่างจากชุดการทดลองของเม็ดลูกดินและปุ๋ยยูเรียอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า EC ในน้ำชะของชุดการทดลองปุ๋ยยูเรียและเม็ดลูกดินทั้งสองสภาวะ (น้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์) อยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบ (Non-saline $<400\mu\text{S/cm}$, 0.4 mS/cm) ถึงส่งผลต่อพืชน้อยมาก (Very slightly saline 400-800 $\mu\text{S/cm}$) สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ได้แก่ สูตรผสมและขนาดของเม็ดลูกดิน รวมทั้งชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง และการเปลี่ยนแปลงของค่า TN พบว่า ร้อยละสะสมของค่า TN ที่ถูกชะออกมาในทุกชุดการทดลองของเม็ดลูกดินเฉลี่ยสูงถึง $64.60\%\pm 7.307$ - $83.68\%\pm 7.112$ ของค่าเริ่มต้น ขณะที่ Osmocote ยังคงปลดปล่อยค่า TN ได้อย่างสม่ำเสมอ ในช่วงประมาณ 60-500 mg/kg ภายหลัง 120 ชั่วโมงเป็นต้นไป การชะค่า TN ของเม็ดลูกดินพบว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow release) ของยุโรป ($<15\%$ at 24hr) และมาตรฐานปุ๋ยควบคุมปลดปล่อย (controlled release) ของอเมริกาและญี่ปุ่น ($<40\%$ at 24hr) อย่างไรก็ตามการชะค่า TN ออกจากวัสดุเม็ดลูกดินยังคงช้ากว่าปุ๋ยยูเรียซึ่งละลายน้ำได้เกือบ 100% สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TN ในน้ำชะอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ได้แก่ สูตรผสม ขนาดของเม็ดลูกดิน ชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง และอุณหภูมิในการทำแห้ง

ผลการทดสอบภายใต้สภาวะการบ่มดินพบว่า ค่าความชื้นในดินลดลงประมาณร้อยละ 4-5 ภายหลังการผสมเม็ดลูกดิน นอกจากนี้ชุดการทดลองของเม็ดลูกดิน (modified with urea) และชุดการทดลองปุ๋ยยูเรียพบว่าสามารถสมดุลความชื้นได้ดีกว่าชุดการทดลองควบคุม (control) สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ได้แก่ สูตรผสมของเม็ดลูกดิน ในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองควบคุม พบว่าค่า pH และ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ของดินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว คือ 8-9 และ 200-400 mg/kg ภายใน 1 สัปดาห์จนสิ้นสุดการทดลอง (1 เดือน) สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ในดินอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ได้แก่ ขนาดของเม็ดลูกดิน ตลอดช่วงการศึกษาไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ (1.5-2.4 mg/kg) และปริมาณอินทรีย์วัตถุ (1.92-2.24%) ในทุกชุดการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) และที่สิ้นสุดการทดลอง (1 เดือน) พบว่าชุดการทดลองเม็ดลูกดิน (modified with urea) มีค่า TN ประมาณ 1,100-1,670 mg/kg ซึ่งสูงกว่าชุดการทดลองควบคุม (unmodified with urea) 5.5-8.4 เท่า

สารบัญเรื่อง

หน้า

Executive Summary

กิตติกรรมประกาศ

Abstract

บทคัดย่อ

บทที่ 1 บทนำ

1.1	ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3	ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย	4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1	แร่ดินขาว (White Clay or China Clay)	5
2.2	แร่ดินเบา (Diatomaceous earth or Diatomite)	9
2.3	การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless culture)	12
2.4	ปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizer)	25
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย	34
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย	35
3.3	การวิเคราะห์ข้อมูล	42

บทที่ 4 ผลดำเนินการวิจัย

4.1	การพัฒนาเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า	44
4.2	การเตรียมวัสดุเม็ดลูกดินด้วยสารละลายยูเรีย	53
4.3	การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการชะล้าง	54
4.4	การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการบ่มดิน	78

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1	บทสรุป	88
5.2	ข้อเสนอแนะของการวิจัย	94

บรรณานุกรม	95
------------	----

ภาคผนวก

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินขาว	8
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินเบา	11
ตารางที่ 2.3	ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน	21
ตารางที่ 2.4	สารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนที่ละลายน้ำได้ต่ำบางชนิด	29
ตารางที่ 3.1	สูตรผสมของเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า	37
ตารางที่ 3.2	เกณฑ์พิจารณาคุณสมบัติวัสดุปลูก	38
ตารางที่ 3.3	แผนการทดลองของการศึกษาระยะที่ 3	41
ตารางที่ 3.4	แผนการทดลองของการศึกษาระยะที่ 4	42
ตารางที่ 4.1	ลักษณะเนื้อดิน สี และการหดตัวของวัสดุผสม	46
ตารางที่ 4.2	สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลเบื้องต้นของวัสดุที่พัฒนาขึ้น	48
ตารางที่ 4.3	องค์ประกอบของเม็ดลูกดินโดยวิธี XRF (X-Ray-Fluorescence)	49
ตารางที่ 4.4	สมบัติทางเคมีและการชะโลหะหนักของเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6	50
ตารางที่ 4.5	สมบัติทางกายภาพและทางกลของเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6	51
ตารางที่ 4.6	ปริมาณ TN และ NO ₃ ⁻ -N ของเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียเข้มข้น 10%	53
ตารางที่ 4.7	ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ในเม็ดลูกดินที่สิ้นสุดการทดลองภายใต้สภาวะการชะล้าง	78
ตารางที่ 4.8	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง (ชุดดินสันทราย กลุ่มชุดดินที่ 22)	79

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1.1	การประยุกต์ใช้วัสดุเม็ดลูกดินจากเศษดินขาวเป็นบัลกิ้งเอเจนท์ในการหมักปุ๋ย	2
ภาพที่ 1.2	การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมื่อใช้วัสดุเม็ดลูกดินเป็นบัลกิ้งเอเจนท์ในการหมักปุ๋ย	3
ภาพที่ 2.1	ลักษณะของแร่ดินขาว	5
ภาพที่ 2.2	โครงสร้างของแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite)	7
ภาพที่ 2.3	แร่ดินเบา (Diatomaceous earth)	10
ภาพที่ 2.4	การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless culture)	13
ภาพที่ 2.5	เทคนิคการปลูกในสารละลายธาตุอาหารแบบน้ำไหลบาง (Nutrient Film Technique)	15
ภาพที่ 2.6	เทคนิคการปลูกในสารละลายธาตุอาหารแบบน้ำไหลลึก (Deep Water Technique)	16
ภาพที่ 2.7	เทคนิคการปลูกพืชในอากาศ (Aeroponics)	17
ภาพที่ 2.8	วัสดุปลูกโดยไม่ใช้ดินที่เป็นอนินทรีย์สาร	19
ภาพที่ 2.9	วัสดุปลูกโดยไม่ใช้ดินที่เป็นอินทรีย์สาร	20
ภาพที่ 2.10	วัสดุปลูกโดยไม่ใช้ดินที่เป็นวัสดุสังเคราะห์	20
ภาพที่ 2.11	Slow and controlled release Urea fertilizer (Sulphur Coated Urea)	26
ภาพที่ 3.1	วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา	34
ภาพที่ 3.2	การเก็บตัวอย่างดิน (แปลงทดลองพื้นที่แม่เหียะ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) ที่ใช้ในการศึกษา	35
ภาพที่ 3.3	การผลิตเม็ดลูกดิน (ก-ง)	36
ภาพที่ 3.4	การเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากเม็ดลูกดิน (ก-ค)	39
ภาพที่ 3.5	การทดลองปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการชะล้าง	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.6 การทดลองพลวัตรการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการบ่มดิน	43
ภาพที่ 4.1 วัสดุเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น	44
ภาพที่ 4.2 ลักษณะเนื้อดินที่ผ่านกระบวนการผลิตทั้ง 15 สูตร	46
ภาพที่ 4.3 ลักษณะเนื้อดินของสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์เบื้องต้นจำนวน 7 สูตร	47
ภาพที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานของเม็ดลูกดินสูตร 3 (A=ขยาย 500 เท่า; B=ขยาย 3,000 เท่า)	52
ภาพที่ 4.5 ลักษณะสัณฐานของเม็ดลูกดินสูตร 6 (A=ขยาย 500 เท่า; B=ขยาย 3,000 เท่า)	52

สารบัญแผนภูมิ

	หน้า
แผนภูมิที่ 2.1 ปฏิกริยาการเกิดดินขาวแหล่งต้นกำเนิด	6
แผนภูมิที่ 2.2 วัฏจักรธาตุอาหารในระบบเกษตรกรรม	26
แผนภูมิที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเมล็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	56
แผนภูมิที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเมล็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	57
แผนภูมิที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเมล็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	58
แผนภูมิที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเมล็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	60
แผนภูมิที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเมล็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	63
แผนภูมิที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเมล็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	63
แผนภูมิที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเมล็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C, DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	64
แผนภูมิที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเมล็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เมล็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัตว์ด้วยน้ำกลั่น)	65

สารบัญแผนภูมิ

	หน้า
แผนภูมิที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของ Osmocote (DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)	66
แผนภูมิที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของปุ๋ย Urea (DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)	66
แผนภูมิที่ 4.11 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมิดด้วยน้ำกลั่น)	69
แผนภูมิที่ 4.12 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)	70
แผนภูมิที่ 4.13 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมิดด้วยน้ำกลั่น)	71
แผนภูมิที่ 4.14 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)	72
แผนภูมิที่ 4.15 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมิดด้วยน้ำกลั่น)	74
แผนภูมิที่ 4.16 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)	75
แผนภูมิที่ 4.17 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมิดด้วยน้ำกลั่น)	76
แผนภูมิที่ 4.18 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm) (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)	77

สารบัญแผนภูมิ

	หน้า
แผนภูมิที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	80
แผนภูมิที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	81
แผนภูมิที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{NH}_3\text{-N}$ ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	83
แผนภูมิที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงค่า $\text{NO}_3\text{-N}$ ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	84
แผนภูมิที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่า OM ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	85
แผนภูมิที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่า TN ของเม็ตลูกดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย

แม้ว่าเทคโนโลยีหรือระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soiless culture) เช่น การปลูกในสารละลายธาตุอาหาร (Water culture) การปลูกให้รากลอยอยู่กลางอากาศ (Aeroponics) และการปลูกแบบใช้วัสดุปลูกทดแทนดิน (Substrate culture) มีแนวโน้มนิยมมากยิ่งขึ้นและมีความสำคัญเพิ่มสูงขึ้นสำหรับการเติบโตของประชากรเมืองในอนาคต เนื่องจากสามารถปลูกได้ทุกที่และลดข้อจำกัดของสภาพดินที่เพาะปลูกได้ เช่น ดินที่ไม่อุดมสมบูรณ์ ขาดธาตุอาหาร หรือพื้นที่หินหรือดินปนทราย นอกจากนี้การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินยังช่วยเพิ่มผลผลิต สามารถควบคุมโรค แมลง และสารอาหารได้ดีกว่าการปลูกพืชในดิน อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการปลูกพืชในสารละลายธาตุอาหารและการปลูกให้รากลอยอยู่กลางอากาศนั้น ยังคงมีต้นทุนค่อนข้างสูงมาก ซึ่งจำเป็นต้องมีการลงทุนทั้งโรงเรือนและอุปกรณ์ ประกอบกับต้องการผู้เชี่ยวชาญด้านวิทยาศาสตร์การเกษตรสมัยใหม่ในการควบคุมดูแลระบบอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นข้อจำกัดของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว สำหรับวัสดุปลูกทดแทนดินที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น แกลบ ถ่าน กาบมะพร้าว ขี้เลื่อย เปลือกไม้ ทรายหยาบ อิฐหัก และเพอร์ไลท์ เป็นต้น ในอนาคตอาจมีข้อจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่เป็นชีวมวลซึ่งจะถูกนำไปใช้ในภาคพลังงานเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้วัสดุปลูกบางอย่างมีน้ำหนักมากไม่สะดวกต่อการใช้งานและมีปัญหาต่อการกำจัดทิ้งภายหลังการใช้งาน ดังนั้นการพัฒนาวัสดุปลูกพืชทดแทนดินที่มีความพรุน กักเก็บความชื้น น้ำหนักเบาและสะดวกต่อการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่ายภายใต้ต้นทุนที่ต่ำ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจยิ่งสำหรับเทคโนโลยีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินรวมถึงการปลูกพืชไม่กระถาง เป็นต้น

จากข้อมูลเชิงประจักษ์พบว่า การใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณที่มากเกินไปจนเกินความจำเป็นซึ่งไม่เพียงแต่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านสิ่งแวดล้อม (ดินและน้ำ) และความหลากหลายของระบบนิเวศถูกละเลยยังส่งผลวิกฤตต่อสถานะโลกร้อนและส่งผลกระทบต่อภาคการเกษตร (ภาคการผลิต) อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งมีค่าการดูดกลืนรังสีสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 310 เท่า [1] ถูกปลดปล่อยเข้าสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณสูงภายใต้การใช้ปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ที่เกินความจำเป็น นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ในการเกษตรแบบดั้งเดิมมักสูญเสียธาตุอาหารไปกับการชะล้างเป็นส่วนใหญ่ ทำให้พืชดูดซึมธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้น้อยและสิ้นเปลืองปุ๋ยเคมีที่ใช้ ในที่สุดย่อมส่งผลให้เกษตรกรมีต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นขณะที่ราคาผลผลิตตกต่ำ อย่างไรก็ตามปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ยังคงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการเกษตรกรรมและถือเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มผลผลิตพืชของประเทศปัจจัยหนึ่ง ข้อดีของปุ๋ยเคมี คือ นอกจากสามารถทำให้ดินมีธาตุอาหารตามความต้องการของพืชและให้ผลตอบสนองค่อนข้างเร็วแล้ว ยังเป็นปุ๋ยที่หาได้ง่ายในปริมาณสูงและสะดวกต่อการใช้งาน สำหรับข้อดีของการใช้ปุ๋ยเคมีต้องยอมรับว่าปุ๋ยเคมีสามารถละลายน้ำได้ดีจึงเกิดการชะล้างได้โดยง่าย ดังนั้นการใช้ปุ๋ยเคมีต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุด โดยพืชจะต้องสามารถดูดซึมปุ๋ยเคมีไปใช้ในการเจริญเติบโตให้ได้มากที่สุด ขณะเดียวกันต้องเกิดการสูญเสียปุ๋ยเคมีระหว่างกระบวนการเพาะปลูกให้น้อยที่สุด

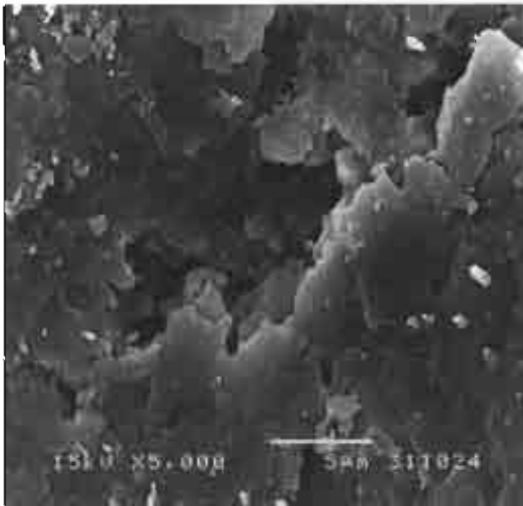
การพัฒนาปุ๋ยละลายช้าหรือปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้าๆ ถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจยิ่งสำหรับการใช้ปุ๋ยเคมีให้เกิดประโยชน์สูงสุด อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายให้แก่เกษตรกรเนื่องจากราคาปุ๋ยเคมีที่เพิ่มสูงขึ้นหลายเท่าตัวในปัจจุบัน ที่ผ่านมามีกรรมวิธีการผลิตปุ๋ยเคมีละลายช้าหลายวิธี เช่น 1) การเคลือบผิวอนุภาคปุ๋ยเคมี (coated fertilizer) ด้วยกัมมะถันหรือสารเคลือบต่างๆ เช่น เรซิน หรือโพลีเมอร์ เป็นต้น 2) การทำให้เกิดอนุภาคแขวนลอยในตัวกลางที่ไม่ละลายน้ำ (matrix fertilizer) ตัวอย่างที่ใช้ได้แก่ ยางมะตอย และ พาราฟิน เป็นต้น 3) การผลิตแบบแคปซูล (encapsuled fertilizer) โดยการบรรจุปุ๋ยไว้ในแคปซูล 4) ผลิตเป็นเม็ดหรือแท่งขนาดใหญ่ (supper granules) โดยนำสารที่เป็นปุ๋ย มาผสมกับสารปรุงแต่ง เช่น ดินเหนียว ซีโอไลท์ หรือหินฟอสเฟต แล้วอัดลงในแม่พิมพ์ และ 5) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสาร(chemically modified fertilizer) ปุ๋ยเคมีที่ผสมหรือบรรจุอยู่ภายในจะค่อยๆ ละลายปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องเป็นเวลานาน ทำให้ประหยัดปุ๋ยเคมีและพืชได้ธาตุอาหารอย่างเพียงพออย่างต่อเนื่องตลอดช่วงอายุของพืช [2] ซึ่งแตกต่างจากปุ๋ยเคมีธรรมดาทั่วไปที่ละลายน้ำอย่างรวดเร็ว และสลายธาตุอาหารออกมาค่อนข้างสูงในช่วงแรกของการเพาะปลูก หลังจากนั้นปริมาณปุ๋ยเคมีจะลดลงและหมดไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการผลิตปุ๋ยละลายช้าในลักษณะนี้ยังคงมีต้นทุนที่สูง ประกอบกับองค์ความรู้และการวิจัยต้นน้ำที่เกี่ยวข้องกับปุ๋ยละลายช้าของประเทศค่อนข้างน้อย ดังนั้นการพัฒนานวัตกรรมปุ๋ยละลายช้าอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ต้นทุนที่ต่ำสำหรับการเกษตร เฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้กับพืชไม้ประดับหรือพืชไม้กระถางที่มีมูลค่า ถือเป็นโจทย์ที่ท้าทายการวิจัยและการพัฒนาอย่างสูงระดับหนึ่ง

เมื่อเร็วนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวัสดุเม็ดลูกดินจากเศษดินขาว (ภาพที่ 1.1) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเซรามิก เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกถึงเอเจนท์สำหรับการหมักปุ๋ย ภายใต้สมมติฐานการใช้งาน ดังนี้คือ 1) ไม่เป็นพิษต่อการทำงานของจุลินทรีย์ 2) ช่วยดูดซับความชื้นส่วนเกิน 3) เพิ่มปริมาณความพรุนและการระบายอากาศให้แก่วัสดุหมัก 4) ย่อยสลายได้ยากและทนต่อการเสียดสี และ 5) สามารถนำกลับคืนมาใช้ใหม่ได้โดยง่าย [3]

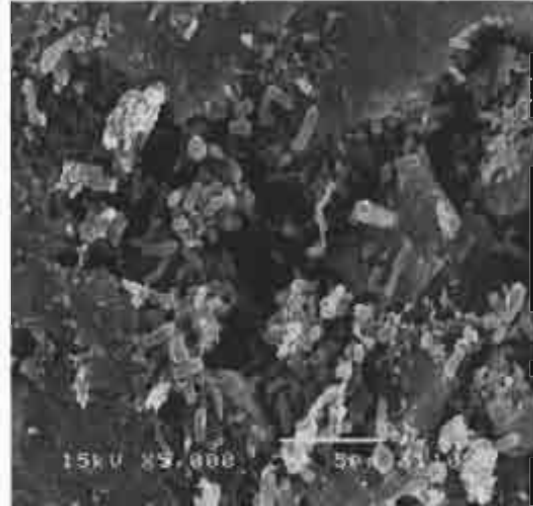


ภาพที่ 1.1 การใช้วัสดุเม็ดลูกดินจากเศษดินขาวเป็นบัลกถึงเอเจนท์ในการหมักปุ๋ย
ที่มา: บัญจรัตน์ โจลานันท์ และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร (2553)

ผลการศึกษาพบว่า การใช้วัสดุเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้นสามารถทำหน้าที่เป็นบัลแกจเอเจนท์ให้แก่ระบบการหมักอย่างมีประสิทธิภาพตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ ช่วยส่งเสริมสภาพการระบายอากาศ ช่วยดูดซับความชื้นส่วนเกินและอมความชื้นได้ดี ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อีกแนวทางหนึ่ง (ภาพที่ 1.2 ก-ข)

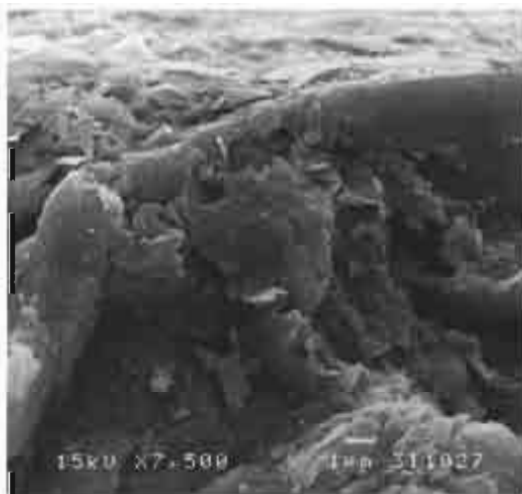


ภาพพื้นผิวก่อนการหมัก (x5000 เท่า)

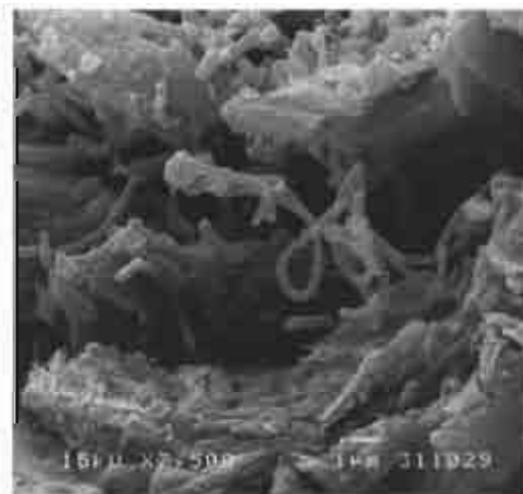


ภาพพื้นผิวหลังการหมัก (x5000 เท่า)

ภาพที่ 1.2 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมื่อใช้วัสดุเม็ดลูกดินเป็นบัลแกจเอเจนท์ในการหมักปุ๋ย
(ก) การเปรียบเทียบพื้นผิวของวัสดุเม็ดลูกดิน (SEM analyses)
ที่มา: บัญจรัตน์ โจลานันท์ และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร (2553)



ภาพตัดขวางก่อนการหมัก (x7500 เท่า)



ภาพตัดขวางหลังการหมัก (x7500 เท่า)

ภาพที่ 1.2 การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เมื่อใช้วัสดุเม็ดลูกดินเป็นบัลแกจเอเจนท์ในการหมักปุ๋ย
(ข) การเปรียบเทียบภาพตัดขวางของวัสดุเม็ดลูกดิน (SEM analyses)
ที่มา: บัญจรัตน์ โจลานันท์ และ สิรินทรเทพ เต้าประยูร (2553)

จากที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าวัสดุเม็ดลูกดินมีส่วนช่วยรักษาสมดุลความชื้น อีกทั้งยังเพิ่มความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดินได้ จึงมีศักยภาพในการต่อยอดสำหรับประยุกต์ใช้ทำหน้าที่เป็นวัสดุปลูกพืชและเม็ดปุ๋ยละลายช้า ธาตุอาหารที่ซึมในเนื้อและเคลือบผิวของวัสดุเม็ดลูกดินจะค่อยถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อบำรุงดินและถูกใช้ประโยชน์อย่างต่อเนื่องโดยพืช ดังนั้น โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาต่อยอดนวัตกรรมวัสดุเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า รวมทั้งศึกษาสถานะการผลิตและการใช้งานที่เหมาะสมรวมทั้งประมาณการเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น ประโยชน์ที่ได้ถือเป็นการสร้างองค์ความรู้และทางเลือกใหม่ของเทคโนโลยีวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้าทางการเกษตร นอกจากนี้ยังส่งผลเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและบรรเทาปัญหาโลกร้อน เนื่องจากลดการสูญเสียของสารประกอบไนโตรเจนของปุ๋ยเคมีในรูปของ $\text{NO}_2\text{-N}$ รวมทั้งการเพิ่มมูลค่าวัสดุในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้าด้านการเกษตร
- 1.2.2 เพื่อหาสถานะการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า
- 1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารภายใต้สถานะการชะล้าง (leaching process) เมื่อใช้เม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.4 เพื่อศึกษาพลวัตและความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหารในดิน (mineralization process) เมื่อใช้เม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น
- 1.2.5 เพื่อสร้างองค์ความรู้และต่อยอดเชิงพาณิชย์เป็นทางเลือกใหม่ด้านวิทยาการและเทคโนโลยีการเกษตร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ในเบื้องต้นวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาและผลิตเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า ได้แก่ ดินขาว (China Clay) ดินเบา (Diatomite) และ ขี้เลื่อย (Sawdust)
- 1.3.2 กำหนดศึกษาช่วงอุณหภูมิการทำให้แห้ง $750\text{-}800^\circ\text{C}$ และใช้ยูเรีย (Urea) เป็นปุ๋ยไนโตรเจน (Commercial N fertilizer) หลักในการวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

- 1.4.1 นวัตกรรมเม็ดลูกดินและองค์ความรู้ใหม่สำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้าของประเทศ
- 1.4.2 ได้ข้อมูลสถานะการผลิตเม็ดลูกดินที่เหมาะสมรวมทั้งพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารในดินและภายใต้สถานะการชะล้าง
- 1.4.3 สร้างทางเลือกในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินและลดการนำเข้าปุ๋ยละลายช้าจากต่างประเทศ
- 1.4.3 สร้างความเข้มแข็งทางการวิจัยของสถาบันการอุดมศึกษาไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แร่ดินขาว (White Clay or China Clay)

ดินขาว จัดเป็นแร่ชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นผงสีขาวมีองค์ประกอบด้วยแร่ เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ฮาลลอยไซต์ (Halloysite) หรือ อิลไลต์ (Illite) เป็นส่วนใหญ่ (ภาพที่ 2.1) สูตรทางเคมีของดินขาวบริสุทธิ์ตามทฤษฎีจะมีองค์ประกอบ คือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเกิดจากการผุพังสลายตัวโดยธรรมชาติ (weathering) ของแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) หรือหินฟินม้า ดินขาวหรือบางครั้งเรียกว่า เกาลิน (Kaolin or China clay) มาจากภาษาจีนแปลว่าเนินสูง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดและจุดพบของดินขาวในประเทศจีน ต่อมาเมื่อมีการขุดพบวัสดุลักษณะนี้ จึงนิยมเรียกว่า ไชน่า เคลย์ (China clay) เนื่องจากแหล่งเกิดของดินขาวกระจายอยู่ทั่วโลก ดังนั้นส่วนประกอบทางเคมีและทางแร่ก็จะแตกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิดนั้น เช่น ดินขาวจากแหล่งคอร์นวอลล์ (Cornwall) และเดวอน (Devon) ในประเทศอังกฤษ ส่วนประกอบทางแร่จะเป็น เคโอลิไนต์ เช่นเดียวกับกับดินขาว (China clay) ของจีน ส่วนในประเทศญี่ปุ่นจะพบลักษณะที่เรียกว่า ไชน่า สโตน (China stone) ซึ่งเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่สามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์เซรามิกเนื้อปอร์ซเลนหรือสโตนแวร์ได้ ส่วนประกอบจะเป็น ควอตซ์ ซีริไซต์ (Sericite) เคโอลิไนต์ และแร่อื่นๆ สำหรับประเทศไทยเราสามารถพบแหล่งกำเนิดดินขาวกระจายตามภูมิภาคต่างๆ เช่น ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ ได้แก่ เชียงราย ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง ชุมพร สุราษฎร์ธานี และนราธิวาส เป็นต้น [5]



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของแร่ดินขาว

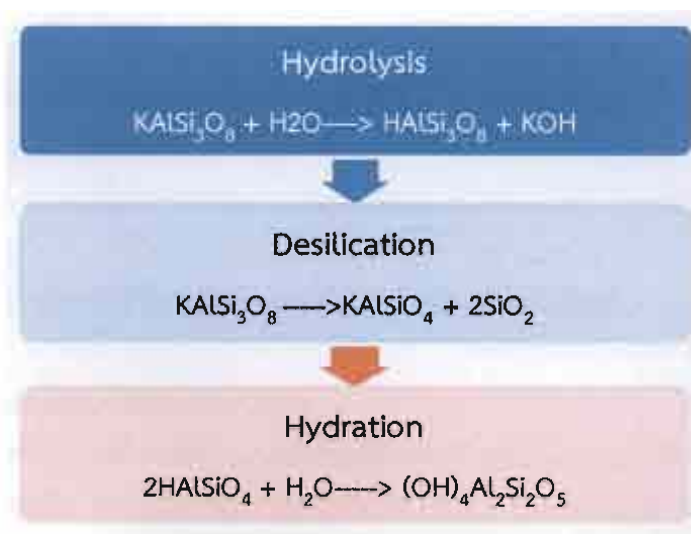
2.1.1 ลักษณะแหล่งกำเนิดแร่ดินขาว [6,7]

ดินขาวส่วนใหญ่เป็นดินที่เกิดขึ้นอยู่ในแหล่งผุพังของหินเดิม (residual clay) ส่วนประกอบทางเคมีและทางฟิสิกส์ของดินขาวมักแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิด การกำเนิดและการสะสมของแร่ดินขาว

สามารถจำแนกออกเป็น 3 แหล่ง คือ แหล่งต้นกำเนิด แหล่งสะสมที่ลุ่ม และแหล่งที่เกิดจากน้ำแร่เข้าไปแทนที่ในหิน

1) แหล่งต้นกำเนิด (residual deposits)

ดินขาวแหล่งนี้ มักพบในลักษณะบนภูเขาหรือที่ราบ ซึ่งแต่เดิมเป็นแหล่งแร่หินฟีนมา เมื่อหินฟีนมาผุพังโดยธรรมชาติ (weathering) จะเหลือเป็นดินขาวอยู่ ณ ที่นั้น โดยปกติกระบวนการเกิดดินขาว (Kaolinization) นี้มีขั้นตอนของปฏิกิริยาหลัก 3 ขั้นตอน (แผนภูมิที่ 2.1) คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ปฏิกิริยาการสลายตัวให้ซิลิกา (desilication) และปฏิกิริยาการรวมตัวกับน้ำ (hydration) อย่างไรก็ตามอาจพบสิ่งสกปรกในดินขาวแหล่งนี้ คือ ซิลิกา (Silica) มีสูตรเคมีเป็น SiO_2 นอกจากนี้ก็มีหินฟีนมา และผลผลิตอื่น ๆ ที่ยังไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์ เป็นต้น แหล่งดินชนิดนี้ที่พบในประเทศไทย ได้แก่ อำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง อำเภอละอุ่น จังหวัดระนอง เป็นต้น



โดยที่ KAlSi_3O_8 คือ หินฟีนมาชนิดโปแตช (Potash Feldspar)

$(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ คือ ดินขาว (Kaolinite)

แผนภูมิที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดดินขาวแหล่งต้นกำเนิด

2) แหล่งสะสมที่ลุ่ม (sedimentary deposits)

แหล่งดินขาวลักษณะนี้เกิดจากดินขาวจากแหล่งแรก (แหล่งต้นกำเนิด) ถูกกระแสน้ำพัดพาไปและไปสะสมที่บริเวณที่ราบลุ่ม เป็นแหล่งดินที่เกิดจากการผุพังเปลี่ยนแปลงสภาพของแร่และหินจากแหล่งต้นกำเนิด สำหรับในประเทศไทยมีแหล่งดินขาวลักษณะนี้หลายจังหวัด เช่น ลำปาง อุตรดิตถ์ ปราจีนบุรี ระนอง สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช เป็นต้น

3) แหล่งที่เกิดจากน้ำแร่เข้าไปแทนที่ในหิน (hydrothermal replacement)

การเกิดในลักษณะนี้ เป็นผลจากการเย็นตัวของหินอัคนี ทำให้น้ำแร่ไหลซึมเข้าสู่ช่องว่างในหินและทำการชะธาตุบางส่วนในหินเดิมออกไป ขณะเดียวกันธาตุต่างๆที่มีอยู่ในน้ำแร่จะเกิดการตกผลึกเป็นแร่ชนิดใหม่ ลักษณะการเกิดแร่ดินแบบนี้ต้องขึ้นกับองค์ประกอบหรือปัจจัยที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเป็นกรดด่าง เป็นต้น

2.1.2 แหล่งแร่ดินขาวของประเทศ [5,6,7]

แหล่งดินขาวที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศ ได้แก่ ระนอง ลำปาง และ ปราจีนบุรี นอกจากนี้ยังมีที่ เชียงใหม่ ตรัง สุราษฎร์ธานี นราธิวาส ชลบุรี สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ พบว่ามักมาจากแหล่งนราธิวาส เป็นต้น

1) แหล่งดินขาวจังหวัดลำปาง

ดินขาวลำปางสามารถพบได้หลายบริเวณ ๆ ที่สำคัญ คือ บริเวณเขาปางค่า อำเภอแจ้ห่ม ดินขาวบริเวณนี้เกิดจากการผุพังสลายตัวของแร่เฟลด์สปาร์ที่อยู่ในหินไรโอไลต์ มีสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปผสมเป็นเนื้อดินสำหรับการทำเครื่องเคลือบดินเผาชนิดขาว

2) แหล่งดินขาวจังหวัดระนอง

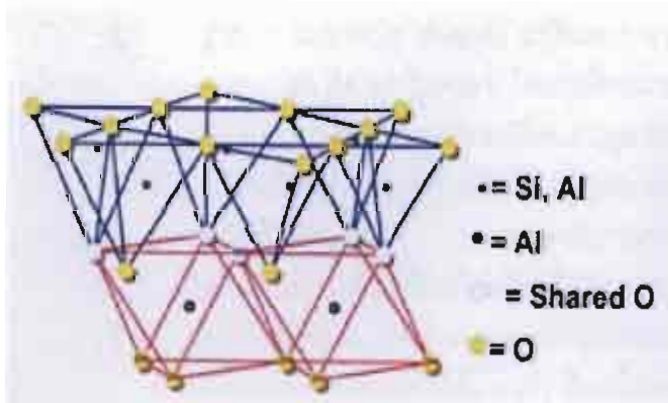
ดินขาวในบริเวณนี้เกิดจากกระบวนการที่ก๊าซร้อนเข้าไปเปลี่ยนสภาพหินเดิมซึ่งเป็นไบโอไทต์-แกรนิต ให้กลายเป็น มัสโคไวต์-ทัวร์มาลีน-เคโอลิไนต์-แกรนิต โดยเฉพาะแร่เฟลด์สปาร์ได้ถูกก๊าซร้อนทำให้เปลี่ยนสภาพกลายเป็นเคโอลิไนต์ สมบัติดินบริเวณนี้มีความเหนียวน้อยแต่เผาแล้วให้สีขาวและผสมทำกระดาษได้ แหล่งที่พบ เช่น ตำบลบางริน ตำบลหาดส้มแป้น อำเภอละอุ่น เป็นต้น

3) แหล่งดินขาวจังหวัดปราจีนบุรี

ดินขาวแหล่งนี้คาดว่ามีต้นกำเนิดจากหินแกรนิตที่อยู่ใต้หินภูเขาไฟ รวมทั้งที่ถูกพัดพามาสะสมตัวเป็นชั้นในแอ่งที่ราบ เป็นดินขาวละเอียดปนทราย มีความเหนียวพอประมาณแต่มีความทนไฟสูง แหล่งดินที่พบ ได้แก่ บ้านโคกไม้ลาย และบ้านหนองใหญ่ อำเภอเมือง เป็นต้น

2.1.3 โครงสร้างและคุณสมบัติของแร่ดินขาว

ผลึกบริสุทธิ์ของดินขาวมีโครงสร้างแบบฟิโลซิลิเกต (Phyllosilicate) คือ เป็นแผ่นๆ ชนิด 1:1 แต่ละแผ่นวางตัวไม่สมมาตรกัน โดยมีแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรัล (Silica tetrahedral sheet) อยู่ด้านหนึ่งและมีแผ่นอลูมินาเตตระฮีดรัล (Alumina tetrahedral sheet) อยู่อีกด้านหนึ่ง กลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl) จับยึดกับออกซิเจน (Oxygen) ตรงฐานของแผ่นเตตระฮีดรัลแผ่นถัดไปและวางซ้อนกันขึ้นไป ดังผลึกเคโอลิไนต์ในภาพที่ 2.2



กำลังขยาย 1,500 เท่า

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite)

ที่มา: www.rtvanderbilt.com (2012) และ www.sciencelearn.org.nz (2012)

ดินขาวที่พบจากแหล่งต่างๆ มักมีองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากโครงสร้างของดินขาวมีการแทนที่ของโลหะธาตุซึ่งมีประจุบวกต่างๆ กัน เช่น Al^{3+} อาจถูกแทนที่ด้วย Fe^{3+} Mg^{2+} หรือ Ca^{2+} ดินขาวที่มีคุณภาพสูงจะพบแต่ Al^{3+} และสารประกอบแร่อื่น เช่น ควอร์ตซ์ เฟลด์สปาร์ รูไทล์ ไพไรต์ เป็นต้น ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินขาวจากแหล่งภายในประเทศโดยเปรียบเทียบกับแร่ดินขาวบริสทอลล์และแหล่งแร่ต่างประเทศ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินขาว

Chemical Composition (%)	ดินขาวบริสทอลล์	ดินขาวอังกฤษ (Cornwall)	ดินขาวลำปาง	ดินขาวระนอง	ดินขาวปราจีน
SiO_2	46	46-47	60-72	44-49	75
Al_2O_3	39	37-39	12-30	34-39	17
Fe_2O_3		0.4-1.0	0.8-2.0	0.7	0.8
TiO_2		1	0.03-0.07	0.02	0.66
CaO			0.10-0.60	0.02-0.07	0.10
MgO			0.10-0.50	0.10-0.40	0.09
K_2O		1.0-2.0	0.5-6	2.1-2.6	0.17
Na_2O			0.1-3	0.4-0.6	0.09
LOI	14	12.5	5-7	10-13	7

ที่มา: สมชาย พุ่มอิม (2524); กรรณิกา เตชะสกุลมาศ (2528); www.cermas.com (2011)

นอกจากองค์ประกอบทางเคมีแล้ว สมบัติทางกายภาพของแร่ดินขาวถือว่ามีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประโยชน์รวมถึงการปรับปรุงคุณสมบัติที่ต้องการ สมบัติทางกายภาพที่สำคัญมีดังนี้ [5]

- 1) ขนาดเม็ดดิน (particle size) คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากอันหนึ่ง เพราะว่ามีผลเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางด้านความเหนียว (plasticity) และการหดตัวเมื่อแห้ง (drying shrinkage) กล่าวโดยทั่วไปดินเม็ดละเอียด จะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าดินเม็ดหยาบ
- 2) รูปร่าง (particle shape) แร่ดินขาว อนุภาคของมันมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม มีขนาดจาก 0.05 ถึง 10 ไมครอน โดยเฉลี่ยขนาดอยู่ระหว่าง 0.5 ไมครอน
- 3) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล (base exchange capacity) โดยปกติแร่ดินขาวที่บริสทอลล์จะไม่สามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูล ดังนั้นคุณสมบัติข้อนี้สำหรับแร่ดินขาวมีน้อยมาก เนื่องจากการแทนที่กันของพวกอนุมูลบวกในโครงสร้างจึงเกิดการแลกเปลี่ยนได้เมื่อมันเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ หรือดูดซับเอาผลึกของแร่ขนาดเล็กเอาไว้ที่ผิว
- 4) คุณสมบัติเมื่อแห้ง (drying properties) เป็นการหดตัวเมื่อแห้งของแร่ดินล้วนๆ ดินที่มีเนื้อละเอียดจะหดตัวได้มากกว่าดินเนื้อหยาบ
- 5) ความแข็งแรงเมื่อแห้งและหลังจากการเผา (green strength) เป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง ปกติดินขาวจะมีความเหนียวต่ำจึงมีความแข็งแรงน้อยเพราะแตกได้ง่ายเมื่อแห้ง

- 6) คุณสมบัติหลังจากเผา (firing properties) ดินขาวที่มีคุณภาพดี เมื่อเผาแล้วควรจะได้สีขาว แต่ถ้าเป็นสีครีมหรือสีน้ำตาลอ่อนแสดงว่ามีแร่ธาตุเจือปนอยู่สูง แร่ดินขาวมีการหดตัวหลังการเผาประมาณร้อยละ 8–12 กรณีดินขาวที่มีการหดตัวมากกว่าร้อยละ 20 หลังการเผา ไม่ควรใช้ดินขาวนั้นในเนื้อดินปั้นปริมาณมาก

2.1.4 การใช้ประโยชน์ของแร่ดินขาว

กรมทรัพยากรธรณีได้จัดประเภทให้ดินขาวเป็นแร่อุตสาหกรรมชนิดหนึ่งของประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้ดินขาวในอุตสาหกรรมเซรามิก มีส่วนน้อยที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมสี กระดาษ และยาฆ่าแมลง นอกเหนือไปจากอุตสาหกรรมดังกล่าวแล้ว ดินขาวยังสามารถนำไปใช้ได้ ในอุตสาหกรรมอื่นที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของดิน ดังนี้ [5,6,7,10]

- อุตสาหกรรมเซรามิก เช่น ถ้วยชาม เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องประดับ
- อุตสาหกรรมก่อสร้าง เช่น อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น ท่อระบายน้ำ กระเบื้องมุงหลังคา
- อุตสาหกรรมกลึงเหล็กและหล่อเหล็ก
- อุตสาหกรรมกระดาษ โดยเติมลงไปในการเยื่อกระดาษ ทำให้กระดาษ มีคุณสมบัติดูดซับน้ำหมึก ช่วยให้ผิวหน้ากระดาษเรียบและมันเป็นเงา สีของกระดาษขาวขึ้น ช่วยเพิ่มน้ำหนักของกระดาษและทำให้กระดาษทึบแสง
- การผลิตเครื่องกรองน้ำ (water filter) ใช้เป็นไส้กรอง
- ใช้ในการทำฉนวนไฟฟ้าที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง (high-tension insulator) ทำฉนวนไฟฟ้า (electrical porcelain)
- ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น เบ้าหลอม (crucible) ผลิตเซรามิกกึ่งตัวนำ (semi-conducting ceramic)
- อุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม โดยใช้เป็นตัวฟอกสีและตัวเร่งปฏิกิริยา
- อุตสาหกรรมยาง โดยเติมลงไปในการยาง (rubber filler) ให้มีความแข็งแรงทนทาน
- อุตสาหกรรมเกษตร เช่น เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย
- อุตสาหกรรมพรมน้ำมัน ทอผ้า และพลาสติก
- อุตสาหกรรมสี โดยใช้เป็นวัตถุดิบผลิตสีขาว (white pigment)
- อุตสาหกรรมทำยารักษาโรค เครื่องสำอาง ทำฟันปลอม (dental porcelain)

2.2 แร่ดินเบา (Diatomaceous earth or Diatomite)

แร่ดินเบา (Diatomaceous earth) หรือดินไดอะตอม (Diatomite ชื่อเรียกทางวิทยาแร่) คือ ดินซึ่งเกิดจากการทับถมของซากไดอะตอม (ภาพที่ 2.3) ซึ่งเป็นพืชเซลล์เดียวขนาดเล็กมาก ตั้งแต่ 2–2,000 ไมครอน มีผนังเป็นฟอสซิลิกประกอบกัน ไดอะตอมพบได้ในแหล่งน้ำท่วมโลกทั้งน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำเค็ม มีอยู่ประมาณ 12,000–16,000 ชนิด บางชนิดว่ายน้ำได้ แต่บางชนิดต้องอาศัยกระแสน้ำพัดพาไป เมื่อตายลงเปลือกที่เป็นซิลิกาจะตกตะกอนทับถมกันเป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นแหล่งไดอะตอม [11]



ภาพที่ 2.3 แร่ดินเบา (Diatomaceous earth)

ที่มา: www.thenaturelabs.com. (2011)

ดินเบา มีโครงสร้างประกอบด้วยโพรงเล็ก ๆ อยู่ทั่วไป มีเนื้อหยาบพรุนคล้ายขอล็ก และมีปฏิกิริยาทางเคมีเฉื่อย (เฉื่อย) และเป็นตัวนำความร้อนที่เลว องค์ประกอบทางเคมีพบว่า มีปริมาณซิลิกาสูงถึงประมาณร้อยละ 80-90 ขึ้นไป สารจำพวกอลูมินาร้อยละ 2-4 และสารจำพวกเหล็กออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.5-2 ขนาดของผงอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1 μm ไปจนถึงมากกว่า 1 mm แต่ที่พบโดยทั่วไปจะมีขนาดอยู่ในช่วง 10-200 μm [11,12] ในประเทศไทยพบดินเบามากแถบจังหวัดลำปางและการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของดินเบาจังหวัดลำปาง พบว่ามีแร่ Opal-An (45-64%), Quartz (10-14%), Smectite (15-17%), Illite (7-10%), Kaolinite (2-3%), และ Free Fe_2O_3 (0-3%) [12]

2.2.1 แหล่งแร่ดินเบาของประเทศ

แหล่งแร่ดินเบาที่สำคัญ ทั้งชนิดที่เกิดขึ้นในน้ำทะเลและน้ำจืดมีอายุต่าง ๆ กันตั้งแต่ยุคน้ำแข็งตอนกลางของยุคควาเทอร์รี (Quaternary) ถึงยุคเทอร์เชียรี (Tertiary) ในประเทศไทยพบดินเบามากแถบจังหวัดลำปางกระจายกระจายภายในแอ่งลำปางของพื้นที่อำเภอเกาะคา อำเภอแม่ทะ อำเภอเมือง เป็นต้น สำหรับต่างประเทศในทวีปแอฟริกาตอนเหนือสามารถพบดินเบาที่เมืองทริโปลี ในประเทศเยอรมนีพบที่เมืองฮาโนเวอร์ และที่สหรัฐอเมริกามีการผลิตดินเบามากในมลรัฐโอเรกอน แคลิฟอร์เนีย วอชิงตัน ไอดาโฮ และเนวาดา เป็นต้น เชิดศักดิ์ อรรถอารุณ (2544) ได้อธิบายลำดับชั้นหินในบ่อเหมืองดินเบาในพื้นที่คาบเกี่ยวของอำเภอเกาะคาและอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง พบว่าดินเบาที่เกิดขึ้นอยู่ในหมวดหินเกาะคา กลุ่มหินแม่เกาะ ซึ่งเป็นหินที่ตกตะกอนในแอ่งเทอร์เชียรีบริเวณจังหวัดลำปาง โดยมีอายุอยู่ในช่วงสมัยไมโอซีนถึงไพลโอซีน (Miocene to Pliocene) ดินเบาในแถบอำเภอแม่ทะซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณตอนกลางแอ่งลำปาง มีลักษณะเป็นชั้นหนาหรือเป็นฟืดและมีเปลือกไคอะตอมจำนวนมาก สีของดินเบาบริเวณนี้จะอ่อนหรือเป็นสีขาว ส่วนบริเวณทางทิศเหนือของจังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณใกล้ขอบแอ่งหรือด้านรอบนอกของพื้นที่ พบว่าคุณภาพของดินเบาจะค่อนข้างต่ำ เนื่องจากหินส่วนใหญ่จะเป็นหินดินดานปนไคอะตอม และมีการปนเปื้อนของสนิมเหล็กค่อนข้างสูง

2.2.2 สมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินเบา

ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ชัดเจนของแร่ดินเบา คือ มีน้ำหนักเบา มีรูพรุนมาก มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่จับตัวกันเป็นเนื้อแน่น มีผิวหน้าเรียบ แร่ดินเบาหรือ Diatomite ในบริเวณแอ่งลำปางมีค่าความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ประมาณ 0.50-1.0 g/cm³ มีค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ประมาณ 2.1-2.2 ส่วนดินเบาที่แห้งและเป็นผงที่มีความบริสุทธิ์จะมีค่าความหนาแน่นปรากฏประมาณ 0.084-0.269 g/cm³ และมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 ค่าความพรุน (porosity) ของดินเบาที่ความหนาแน่นสูงจะมีค่าความพรุนต่ำในช่วงร้อยละ 60-68 ในขณะที่ดินเบาที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าความพรุนสูงขึ้นถึงในช่วงร้อยละ 70-80 นอกจากนี้ดินเบาสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 1.5-3 เท่าของน้ำหนัก [5,12] สมบัติทางกายภาพของดินเบานั้นจะแตกต่างกันตามแหล่งที่พบ นอกจากนี้ในแหล่งดินเดียวกันก็ยังสามารถแตกต่างกันไปตามความลึกของแหล่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสิ่งเจือปน รวมถึงรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวของไดอะตอมที่ทับถมกัน

สำหรับองค์ประกอบหลักทางเคมีของแร่ดินเบา คือ ซิลิกา (SiO₂) อะลูมินา (Al₂O₃) และสนิมเหล็ก (Fe₂O₃) นอกจากนี้ยังอาจมี ปริมาณปูนขาว (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และออกไซด์ของอัลคาไลอื่น ๆ (Na₂O, K₂O) องค์ประกอบทางเคมีของดินเบาจากแหล่งต่าง ๆ ในโลกแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแร่ดินเบา

Chemical composition (%)	Lompoc, USA	Albacete, Spain	Moler, Denmark	Jilin, PR China	Lampang, Thailand
SiO ₂	89.7	88.6	67.8	90.1	70.8-77.9
TiO ₂					0.35-0.43
Al ₂ O ₃	3.7	0.6	10.3	2.0	11.4-13.6
Fe ₂ O ₃	1.1	0.2	6.9	0.7	2.5-5.9
CaO	0.3	3.0	1.4	0.4	0.09-0.29
MgO	0.6	0.8	1.6	0.3	0.51-0.67
Na ₂ O	0.3	0.5	0.5	0.2	0.12-0.37
K ₂ O	0.4	0.4	1.5	0.4	1.4-1.7
Ignition loss	3.7	5.2	7.9	6.3	4.8-5.5

ที่มา: เชิดศักดิ์ อรรถอารุณ (2544)

2.2.3 การใช้ประโยชน์แร่ดินเบา

ดินเบา มีประโยชน์ทั้งทางอุตสาหกรรม เกษตรกรรม รวมทั้งการประยุกต์ใช้ในทางสิ่งแวดล้อมหลายด้านดังนี้ [5,11,12]

- ใช้เป็นตัวกลาง สารกรอง (filter medium หรือ filtering agent) และตัวช่วยกรอง (filteraid) สิ่งสกปรกหรือสิ่งที่ไม่ต้องการสำหรับระบบการกรองน้ำ ซึ่งใช้ประโยชน์กันอย่างมากในสระว่ายน้ำ ถังจ่ายน้ำอุ่น การประปา ท่อน้ำมัน เป็นต้น
- ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำฉนวนความร้อนและวัสดุดูดซับเสียง

- ใช้เป็นสารเติมแต่ง (mineral filler) ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ ใช้ผสมทำสีภายในอาคาร กระดาษ ยาฆ่าแมลง พลาสติก หมึกพิมพ์ วัตถุระเบิด ไมซีตไฟ ทันตกรรม ฯลฯ
- ใช้เป็นตัวดูดซับ (absorbing agent) สำหรับเป็นสารเคมีทำลายเชื้อโรค สารทำความสะอาดพื้น นอกจากนี้ยังมีงานศึกษาวิจัยที่ค้นพบว่าสามารถใช้ดินเบาตรึงสารพิษและโลหะหนักต่างๆ ในงานสิ่งแวดล้อมได้
- ใช้เป็นวัสดุขัดสีอย่างอ่อน (mild abrasive) ของเครื่องเงินและโลหะ
- ใช้ในโรงงานผลิตสีสังเคราะห์และเม็ดสี (synthetic ultramarine and pigment)
- ใช้เป็นส่วนผสมในโรงงานเครื่องเคลือบ เครื่องปั้นดินเผา คอนกรีต และซีเมนต์อื่นๆ
- ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างประเภทน้ำหนักเบา ในรูปของอิฐ กระเบื้อง โดยอาจผสมกับ ดินยิปซัม ปูนขาว
- ใช้ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมโดยลดการแข็งตัวของปุ๋ยแอมโมเนียไนเตรท และยังสามารถใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมีได้ด้วย

2.3 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless culture)

ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ (2011) ได้อธิบายถึงหลักการของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินว่า โดยธรรมชาติเมื่อพืชเจริญเติบโตอยู่ในดิน ปัจจัยที่สำคัญต่อการดำรงชีวิตของพืช 4 คือ 1) ที่ให้รากยึดเกาะเพื่อทรงต้นขึ้นเหนือดิน 2) น้ำ 3) แร่ธาตุอาหาร และ 4) ออกซิเจนหรืออากาศใช้ในการหายใจของราก ซึ่งมีพร้อมสรรพในดิน อย่างไรก็ตามการปลูกพืชในดิน เกษตรกรอาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ตามธรรมชาติที่ยากต่อการควบคุม ดังนั้นหากสามารถปลูกพืชลงในวัสดุใด ๆ หรือมีรูปแบบการปลูกแบบใหม่ที่สามารถจัดการสิ่งจำเป็นทั้ง 4 ประการนี้ให้กับรากพืชได้ พืชก็สามารถเจริญเติบโตได้โดยไม่ต้องใช้ดิน นอกจากนี้ในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน หากมีการปฏิบัติและจัดการได้ดีและถูกต้องแล้ว จะส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตที่ดี ให้ผลผลิตสูง มีคุณภาพดี ในเวลาที่รวดเร็วและประหยัดกว่าการปลูกในดินซึ่งยังไม่สามารถควบคุมปัจจัยได้ ดังนั้น ความหมายการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน หรือ “ซอยเลสคัลเจอร์” (soilless culture) หมายถึง การปลูกพืชโดยใช้วัสดุใดๆ ที่ไม่ใช้ดิน (ภาพที่ 2.4) ทั้งนี้อาจจำแนกออกเป็น 1) การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบให้รากพืชเจริญเติบโตอยู่ในน้ำสารละลายธาตุอาหารโดยตรง โดยทั่วไปเรียกการปลูกแบบนี้ว่า “ไฮโดรโปนิคส์” (hydroponics) 2) การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินด้วยวิธีการปลูกในวัสดุปลูก (substrate) ที่ไม่ใช้ดิน เช่น หวาย กรวด น้ำ ขุยมะพร้าว แกลบ และวัสดุที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น แรยหิน (rock wool) พูไมซ์ (pumice) เพอร์ไรท์ (perlite) เวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) และเม็ดดินเผา (hydrotron) โดยทั่วไปเรียกการปลูกแบบนี้ว่า “ซับสเตรท คัลเจอร์” (substrate culture) และ 3) การปลูกพืชแบบไม่ใช้ดินแบบที่มีการจับยึดลำต้นพืชไว้ในลักษณะที่ปล่อยให้รากพืชลอยอยู่ในอากาศ โดยไม่สัมผัสสิ่งใดและมีวิธีการให้น้ำและอาหารแก่รากพืชโดยการฉีดพ่นน้ำสารละลายอาหารไปที่รากพืชโดยตรงเป็นระยะๆ โดยทั่วไปเรียกการปลูกแบบนี้ว่า “แอโรโปนิคส์” (aeroponics) [15]



(ก) Hydroponics

(ข) Aeroponics

(ค) Substrate

ภาพที่ 2.4 การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless culture)

ที่มา: <http://hydroponicssystems.co> (2011);

<http://www.hydroponicequipment.co> (2011);

<http://www.hydroponics-gardens.com> (2011)

2.3.1 ความเป็นมาของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

วิวัฒนาการการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินมีมานานกว่า 150 ปี ประกอบกับการประสบปัญหาการใช้ดินปลูกพืชในโรงเรือนที่ดินมีการอัดตัวแน่นทึบเป็นแหล่งสะสมโรคและแมลง จนต้องมีการเปลี่ยนถ่ายดินอยู่เสมอในโรงเรือนในต่างประเทศ (ยุโรป และอเมริกา) จึงทำให้เกิดการคิดค้นทางเลือกอื่นในการปลูกพืช ดังนั้น ราวในปี ค.ศ. 1930 ดร.วิลเลียม เอฟ เกรอร์ริค (Dr. William F. Gericke) จากมหาวิทยาลัยแห่งมลรัฐแคลิฟอร์เนีย เป็นคนแรกที่ได้ทำการสาธิตการปลูกพืชในน้ำสารละลายอาหารเชิงการค้าได้สำเร็จ และตั้งชื่อวิธีการปลูกพืชแบบนี้ว่า “ไฮโดรโพนิกส์” (hydroponics) นับตั้งแต่นั้นเทคนิคการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินก็ได้รับการพัฒนามาโดยตลอด นอกจากการปลูกลงในน้ำสารละลายอาหารโดยตรงแล้ว ก็มีการทดลองใช้วัสดุหลายชนิดมาเป็นวัสดุปลูก อาทิเช่น ทราย กรวด โยหิน เพอร์ไรท์ และเวอร์มิคูไลท์ เป็นต้น [15] การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแม้ว่าจะมีต้นทุนการผลิตที่สูง แต่อาจเป็นเทคนิคทางเลือกที่สำคัญและจำเป็นสำหรับเกษตรกรกรมเขตหนาว เช่น ประเทศเนเธอร์แลนด์ อังกฤษ เดนมาร์ก เบลเยียมฝรั่งเศส นิวซีแลนด์ และญี่ปุ่น ซึ่งมีปัญหาการผลิตพืชในแปลงเปิดไม่ได้ในช่วงอากาศหนาวจัด หรือประเทศที่ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ เป็นทะเลทราย แห้งแล้ง หรือมีน้ำจืดจำกัด เช่น ซาอุดีอาระเบีย ออสเตรเลีย แอฟริกาใต้ จึงต้องหันมาผลิตพืชในโรงเรือนที่สามารถควบคุมปัจจัยและสภาพแวดล้อมบางอย่างได้ ในกรณีของประเทศไทย ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ (2011) ได้ให้เหตุผลถึงความสำคัญของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินอย่างน่าสนใจว่า ความท้าทายของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินนั้นไม่ใช่การแข่งขันกับระบบการเกษตรเดิม เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งน้ำเพียงพอที่ปลูกพืชได้ตลอดทั้งปี และยังมีพื้นที่ดินที่ยังสามารถบำรุงให้มีความอุดมสมบูรณ์พอที่จะปลูกพืชได้มากมายในต้นทุนที่ต่ำกว่าด้วย แต่เหตุผลหลัก คือ กระแสของกลุ่มผู้บริโภคทั้งภายในและต่างประเทศ ที่มีความต้องการบริโภคพืชผักที่มีคุณภาพสูง (สด สะอาด และรสชาติดี) และปลอดภัยจากสารพิษตกค้าง ต้องการบริโภคผักชนิดใหม่ที่ไม่มีการผลิตในดิน เช่น ผักสลัดต่างๆ พืชผักสมุนไพร (Herbs) บางชนิด ต้องการบริโภคผักนอกฤดูที่ได้เฉพาะจากการปลูกในระบบโรงเรือนโดยไม่ใช้ดิน เช่น พริกหวาน แดงกวาญี่ปุ่น แคนตาลูป เป็นต้น รวมทั้งกลุ่มผู้บริโภคไม้ดอก ไม้ประดับ และไม้

กระถางราคาสูง ซึ่งผู้บริโภคลุ่มนี้จัดเป็นกลุ่มที่มีกำลังซื้อสูงและมีแนวโน้มที่ผู้บริโภคลุ่มนี้จะขยายตัวมากขึ้น ดังนั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินจึงสามารถเกิดเป็นธุรกิจในประเทศได้

2.3.2 ข้อควรคำนึงในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

ภายใต้สถานการณ์และสภาพแวดล้อมบางอย่างการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินอาจเป็นสิ่งจำเป็น แต่อาจไม่เสมอไปหากการนำไปประยุกต์ใช้ไม่สร้างความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินที่ควรพิจารณาและคำนึงในการนำไปใช้ พอสรุปได้ดังนี้ [5,15]

1) ข้อดีของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

- ลดข้อจำกัดการปลูกพืชในบริเวณที่มีปัญหาคุณภาพดิน เช่น ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ ดินเป็นกรดจัดหรือเค็มจัด
- ลดข้อจำกัดการปลูกพืชในบริเวณที่ไร้ดินหรือขาดแคลนน้ำ เช่น บริเวณลาดฟ้า หลังคาตึก หรือบริเวณพื้นที่ทะเลทราย เป็นต้น
- สามารถเพิ่มผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูง เนื่องจากพืชไม่ต้องแก่งแย่งน้ำและอาหารระหว่างกันและไม่ต้องคำนึงถึงความอุดมสมบูรณ์ของดิน
- เป็นวิธีการปลูกพืชที่ทำให้พืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เพราะได้รับน้ำและสารอาหารอย่างพอเพียงตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องการพื้นที่ปลูกที่น้อยกว่า
- ผลผลิตที่ได้สะอาดและมีคุณภาพ ทั้งด้านกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ปราศจากเศษหิน ดิน ทราย ปุ๋ยปน ไม่มีสารเคมีและยาฆ่าแมลงตกค้าง และลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์เนื่องจากไม่ใช้ดิน
- ประหยัดค่าแรงงานและเวลาในส่วนขั้นตอนของการเตรียมดิน ใส่ปุ๋ย และฉีดยา จึงทำให้ปลูกพืชรุ่นใหม่ต่อไปได้ทันทีอย่างต่อเนื่อง สามารถปลูกพืชรุ่นใหม่ได้มากครั้งขึ้นต่อปี
- เป็นวิธีการปลูกพืชที่ใช้ทรัพยากรน้ำและปุ๋ยอย่างประหยัด เนื่องจากสามารถนำวนกลับมาใช้ใหม่ได้

2) ข้อเสียของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุนในตอนเริ่มต้นสูง เนื่องจากต้องใช้วัสดุอุปกรณ์ทางเทคนิคหลายชนิดที่มีราคาแพง รวมทั้งค่าก่อสร้างโรงเรือน
- สิ้นเปลืองพลังงานเพราะต้องอาศัยพลังงานตลอดเวลา เช่น พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ทำให้มีต้นทุนการผลิตสูง และหากไฟฟ้าขัดข้องเป็นเวลานานเกินไปและไม่มีระบบไฟฟ้าสำรองจะทำให้พืชที่ปลูกขาดน้ำหรือขาดอากาศ ตายได้ในเวลาอันสั้น
- ต้องการบุคลากรที่มีความรู้ความชำนาญ ในการดูแลรักษาอย่างใกล้ชิด

2.3.3 ประเภทของการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน [5,15,19]

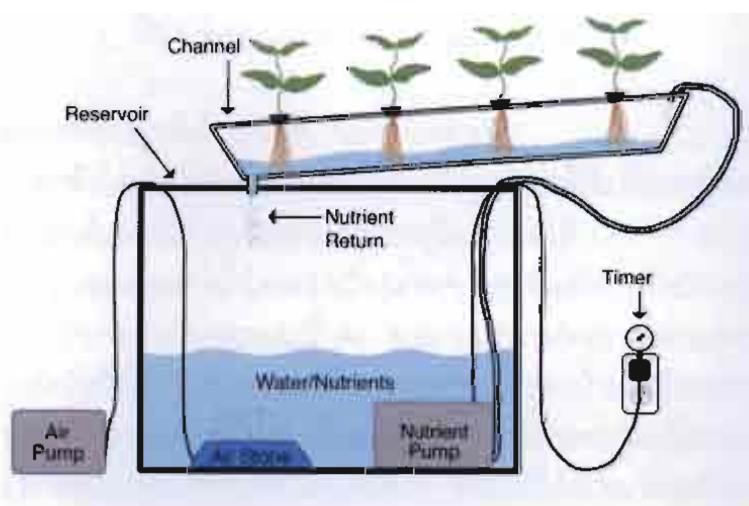
จากการพัฒนารูปแบบการปลูกพืชให้เจริญเติบโตได้โดยไม่ต้องใช้ดิน ปัจจุบันเราสามารถจำแนกวิธีการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ ประเภทการปลูกในสารละลายธาตุอาหาร (water culture) ประเภทการปลูกในอากาศ (aeroponics) และประเภทการปลูกในวัสดุปลูก (substrate culture) โดยมีรายละเอียดพอสังเขป ดังนี้

1) ประเภทการปลูกในสารละลายธาตุอาหาร (Water culture)

การปลูกพืชในลักษณะนี้เป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย รากพืชจะต้องสัมผัสหรือแช่อยู่ในน้ำซึ่งก็คือน้ำสารละลายธาตุอาหาร (nutrient solution) โดยตรงและตลอดเวลา โดยรากพืชบริเวณโคนรากซึ่งจะสัมผัสกับอากาศโดยตรงจะทำหน้าที่ดูดออกซิเจน ส่วนรากดูดอาหารอยู่บริเวณปลายรากซึ่งจะแช่จมอยู่ในสารละลาย สำหรับเทคนิคที่มีการนำมาใช้ปลูกเชิงการค้าในปัจจุบัน คือ

1.1) เทคนิคน้ำไหลบาง (Nutrient Film Technique, NFT)

เป็นเทคนิคการปลูกพืชโดยปล่อยให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืช เป็นชั้นน้ำแผ่นบางๆ หนาเพียง 2-3 mm ไหลผ่านรากพืชที่ปลูกอยู่บนรางปลูกที่ทำจากวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลาย เช่น พลาสติก เป็นต้น (ภาพที่ 2.5)



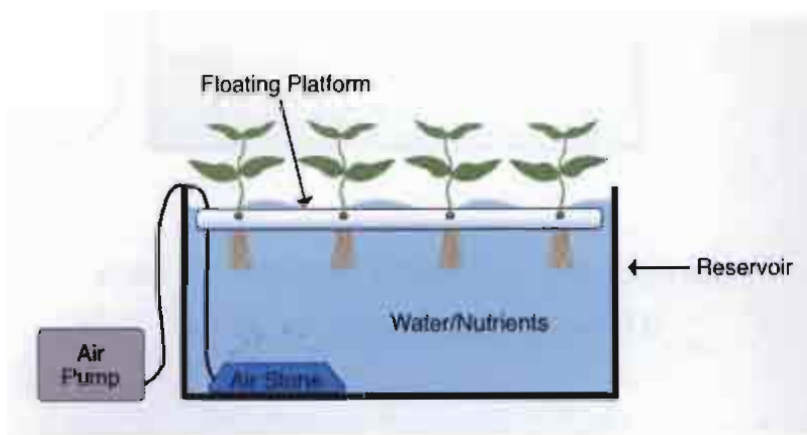
ภาพที่ 2.5 เทคนิคการปลูกในสารละลายธาตุอาหารแบบน้ำไหลบาง (Nutrient Film Technique)

ที่มา: www.steadygrowpro.com (2011)

1.2) เทคนิคการปลูกพืชน้ำไหลลึก (Deep Flow Technique, DFT)

เป็นเทคนิคการให้สารละลายไหลผ่านรากพืชอย่างต่อเนื่อง ในกรณีการเติมอากาศโดยธรรมชาติ ภาชนะบรรจุน้ำจะมีความลึกประมาณ 5-30 cm โดยที่ด้านหนึ่งจะมีท่อน้ำไหลเข้า และที่ปลายอีกด้านหนึ่งมีท่อสำหรับน้ำไหลออก เมื่อน้ำไหลล้นออกไปสู่ท่อออกตกลงสู่ถังพักจะเกิดฟองอากาศ ดังนั้นอากาศจึงถูกเติมลงไปในน้ำโดยอัตโนมัติและน้ำก็จะถูกสูบบวนเวียนกลับเข้ามาในภาชนะอีก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไหลวนของน้ำผ่านรากพืชโดยไม่ต้องมีการเติมอากาศให้กับน้ำในภาชนะ

นั้นโดยตรง สำหรับเทคนิคการปลูกพืชในน้ำนิ่งแบบต้องเติมอากาศ (Deep Water Technique, DWT) เป็นการปลูกพืช (ผักกินใบ) ในภาชนะที่บรรจุน้ำที่มีความลึกตั้งแต่ 15 cm ขึ้นไป (ภาพที่ 2.6) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของต้นและรากพืชที่ปลูก เนื่องจากรากพืชต้องแช่ตลอดเวลาอยู่ในน้ำสารละลายที่ไม่มี การหมุนเวียน ดังนั้นวิธีการปลูกแบบนี้จึงจำเป็นต้องมีการเติมอากาศให้กับน้ำตลอดเวลา [15]

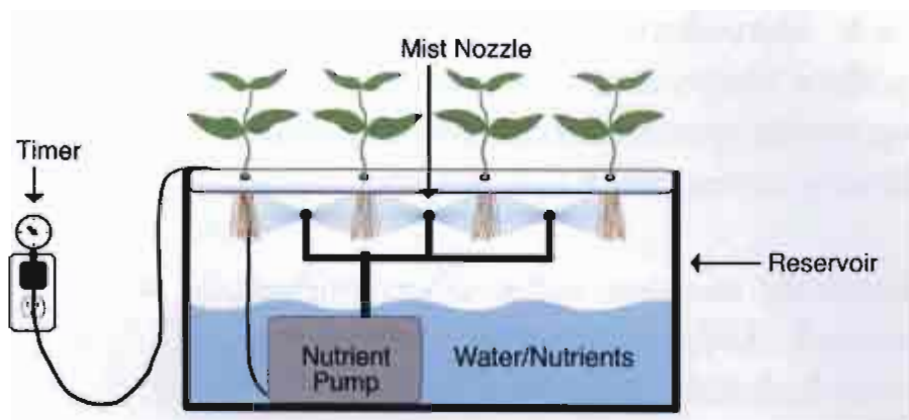


ภาพที่ 2.6 เทคนิคการปลูกในสารละลายธาตุอาหารแบบน้ำไหลลึก (Deep Water Technique)

ที่มา: www.steadygrowpro.com (2011)

2) ประเภทการปลูกพืชในอากาศ (Aeroponics)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในลักษณะนี้รากพืชถูกปล่อยให้เปลือยอยู่ในอากาศ ดังนั้นจึงต้องมีการจับยึดส่วนโคนของลำต้นพืชให้ตั้งตรงและรากลอยอยู่ในอากาศได้ รากพืชจะได้รับการฉีดพ่นสารละลายธาตุอาหารในรูปของละอองน้ำโดยตรงเป็นระยะๆ และต้องมีการกำบังรากไม่ให้ได้รับแสง ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ (2011) อธิบายข้อดีของระบบนี้ คือ สามารถประหยัดสารละลายธาตุอาหารได้เป็นอย่างดีเหมาะสำหรับการปลูกพืชในที่ที่มีพื้นที่จำกัดและมีน้ำน้อย เช่น ชายคาบ้าน หรือยอดอาคารตึก แต่มีข้อเสียคือ ค่อนข้างยุ่งยากในการติดตั้งระบบ นอกจากนี้โดยเฉพาะประเทศในเขตร้อนซึ่งพบปัญหาการสะสมความร้อนและการระบายอากาศของระบบรากภายในภาชนะ จึงอาจยังไม่เหมาะสมที่จะทำเป็นระบบใหญ่เชิงการค้าสำหรับประเทศไทย (ภาพที่ 2.7)



ภาพที่ 2.7 เทคนิคการปลูกพืชในอากาศ (Aeroponics)

ที่มา: www.steadygrowpro.com (2011)

3) ประเภทการปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate culture)

เป็นการปลูกพืชโดยใช้วัสดุอื่นๆ แทนที่จะใช้ดินปลูก โดยทำหน้าที่แทนดินเป็นที่อยู่ของรากพืชสำหรับให้รากยึดและลำต้นพืชซึ่งจะอยู่ร่วมกับสารละลายธาตุอาหารและอากาศ การปลูกพืชลงในวัสดุปลูกแบบนี้เป็นการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการปลูกพืชในดิน ที่เป็นการปลูกพืชลงในกระถางหรือในภาชนะโดยใช้น้ำหยดมากที่สุด อย่างไรก็ตามการพิจารณาเลือกวัสดุปลูกในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติและข้อจำกัดต่างๆ ประกอบกับการเลือกใช้

3.1 คุณสมบัติตามทฤษฎีและข้อจำกัดของวัสดุปลูก

เนื่องจากวัสดุปลูกต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช อิทธิสุนทร นันทกิจ (2011) และวัชร ยาวีไชย (2550) ได้ระบุคุณสมบัติของวัสดุปลูกที่เหมาะสมทางทฤษฎีสำหรับใช้แทนดินทางเทคนิค ดังนี้

- เป็นวัสดุปลูกที่มีคุณสมบัติรักษาอัตราส่วนของน้ำ:อากาศ ให้เหมาะสมตลอดการปลูก อัตราส่วนของน้ำ:อากาศที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ = 50:50 และควรมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 30-80
- เป็นวัสดุที่น้ำหนักเบาวัสดุปลูกควรมีความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง $0.5-0.8 \text{ g/cm}^3$
- เป็นวัสดุที่ต้องไม่มีการอัดตัวหรือยุบตัวเมื่อเปียกน้ำหรือเมื่อใช้ไปนานๆ
- เป็นวัสดุที่ไม่สลายตัวทั้งทางเคมีและทางชีวภาพ
- เป็นวัสดุที่รากพืชสามารถแพร่กระจายได้สะดวกทั่วทุกส่วนของวัสดุปลูก
- เป็นวัสดุที่ไม่มีสารที่เป็นพิษต่อพืชเจือปนอยู่
- เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเฉื่อยทางเคมี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายธาตุอาหารและกับภาชนะที่ใช้บรรจุ

- เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (CEC) ที่เหมาะสม ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกที่เหมาะสม สำหรับวัสดุปลูกในภาชนะควรอยู่ในช่วงระหว่าง 10–30 Cmol(e)/kg หากมีค่าสูงเกินไปทำให้ปริมาณเกลือสูง และมีผลต่อองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารพืชที่อยู่ในวัสดุปลูก ถ้าระดับต่ำเกินไปทำให้สารละลายธาตุอาหารมีปริมาณเกลือต่ำลง
- เป็นวัสดุที่มีค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่เหมาะสม เนื่องค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีผลควบคุมธาตุอาหารที่พืชจะสามารถนำไปใช้ได้ พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในระดับความเป็นกรดเป็นด่างที่เป็นกรดเล็กน้อยถึงกลาง คือ อยู่ในช่วง 6-7 ดังนั้นในการใช้วัสดุปลูกทุกครั้ง ควรตรวจระดับความเป็นกรดเป็นด่างและปรับค่าที่ระดับที่พืชต้องการก่อนนำไปใช้ประโยชน์
- เป็นวัสดุที่ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคและแมลง
- เป็นวัสดุที่สามารถกำจัดโรคและแมลงได้ง่าย สามารถนำวัสดุปลูกกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย

จากที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าไม่มีวัสดุปลูกชนิดใดที่ให้คุณสมบัติครบถ้วนตามทฤษฎี ดังนั้นการประยุกต์ใช้อาจมีทั้งใช้วิธีการนำวัสดุที่มีคุณสมบัติที่แต่ละอย่างมาผสมกัน เพื่อให้วัสดุปลูกมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น หรือวิธีใช้วัสดุเดี่ยวๆ ที่มีความคุ้นเคยและมีความชำนาญในการใช้ สำหรับข้อจำกัดของการใช้วัสดุปลูกพืชแทนดิน โดยส่วนใหญ่มักเป็นข้อจำกัดทางด้านค่าใช้จ่ายและราคา ได้แก่ 1) ราคาของวัสดุปลูกที่นำมาใช้ (ราคานี้รวมถึงค่าขนส่งหรือบางครั้งรวมถึงค่าบรรจุใส่ถุง) 2) ค่าใช้จ่ายด้านอื่นๆ เช่น ค่าแรงงานในการเก็บรักษา (วัสดุปลูกบางชนิดต้องการที่เก็บที่ดีเป็นพิเศษ) ค่าใช้จ่ายในการกำจัดโรคและแมลงเมื่อนำวัสดุนั้นๆ มาใช้ใหม่ เป็นต้น

3.2) ชนิดวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน [5,15,19]

วัสดุปลูกพืชที่ใช้แทนดินสามารถจำแนกออกเป็น 2 ชนิดหลัก คือ 1) วัสดุปลูกจากธรรมชาติ ได้แก่ วัสดุปลูกที่เป็นอินทรีย์สารและวัสดุปลูกที่เป็นอนินทรีย์สาร และ 2) วัสดุปลูกที่สังเคราะห์ขึ้น

3.2.1) วัสดุปลูกที่เป็นอินทรีย์สารจากธรรมชาติ (ภาพที่ 2.8) ได้แก่ กรวด (gravel) หินทราย (sand) โยหิน (rock wool) หินภูเขาไฟ (pumice) เพอร์ไลท์ (perlite) เวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) อิฐหัก ฯลฯ วัสดุปลูกเหล่านี้จะไม่มีธาตุอาหารให้แก่พืช บางชนิดต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศจึงมีราคาแพงมาก แต่มีคุณสมบัติที่ร่วนโปร่งและเบา จึงมีอากาศแทรกอยู่เพียงพอต่อความต้องการของรากพืชและมีคุณสมบัติอุ้มความชื้นตั้งแต่เล็กน้อยจนถึงดีมาก ข้อดีอีกประการหนึ่งของวัสดุประเภทอินทรีย์สาร คือ มีความสะอาดปราศจากเชื้อโรคปนเปื้อนและยังคงทนไม่สลายตัวหรือยุบตัวง่าย ยกเว้นวัสดุเพอร์ไลท์และเวอร์มิคูไลท์ ที่ยุบตัวได้ง่ายและใช้งานได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น



ภาพที่ 2.8 วัสดุปลูกโดยไม่ใช้ดินที่เป็นอินทรีย์สาร

3.2.2) วัสดุปลูกที่เป็นอินทรีย์สารจากธรรมชาติ ได้แก่ ขุยมะพร้าว ขี้เลื่อย แกลบ ถ่าน แกลบ เปลือกไม้ เปลือกถั่วขนอ้อย (ภาพที่ 2.9) เหล่านี้เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จัดเป็นอินทรีย์วัตถุธรรมชาติที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น มีราคาถูก แต่ข้อเสียคือความไม่สมดุลของคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและการระบายอากาศภายในวัสดุตัวเดียวกัน เช่น การใช้ขุยมะพร้าวเพียงอย่างเดียวอาจเกิดสภาพอุ้มน้ำจนชุ่มและขาดอากาศเมื่อน้ำมากเกินไป หรือกรณีใช้แกลบเพียงอย่างเดียวจะไม่อุ้มน้ำและแห้งเกินไปสำหรับรากพืช เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้ผสมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติอุ้มน้ำและการระบายอากาศที่ดี

3.2.3) วัสดุสังเคราะห์ เช่น ฟองน้ำอัดแห้ง และไฮโดรเจล (ภาพที่ 2.10) ฟองน้ำอัดแห้งผลิตจากการนำเศษฟองน้ำหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ และนำกลับมาอัดเป็นแผ่นโดยไอน้ำและตัดเป็นแท่งตามขนาดที่ต้องการ ข้อดีคือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งโดยวิธีการนึ่งฆ่าเชื้อโรคด้วยไอน้ำ อย่างไรก็ตาม ฟองน้ำที่จะนำมาผลิตต้องไม่มีการเติมสารป้องกันการติดไฟ เนื่องจากสารเหล่านี้เป็นพิษต่อพืชอย่างรุนแรง สำหรับวัสดุปลูกไฮโดรเจลจัดเป็นพอลิเมอร์ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ชอบน้ำหรือกลุ่มไฮโดรฟิลิก (hydrophilic group) เช่น หมู่-OH, -COOH, -CONH₂, -CONH- และ -SO₃H และส่วนที่ไม่ชอบน้ำหรือกลุ่มไฮโดรโฟบิก (hydrophobic group) เช่น หมู่ -CH₂- และ -CH₃ เป็นต้น สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือ สามารถพองตัวแต่ไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำ สามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้เนื่องจากแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ดังนั้นเราจึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกพืชช่วยอุ้มน้ำและดูดซับแร่ธาตุอาหารสำหรับรากพืชแทนดินได้ โดยเฉพาะการปลูกพืชประเภทไม้กระถาง



ภาพที่ 2.10 วัสดุปลูกโดยไม่ใช้ดินที่เป็นวัสดุสังเคราะห์

3.3) ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน

อิทธิสุนทร นันทกิจ (2011) และวัชรระ ยาวีไชย (2550) ได้รวบรวมข้อมูลพื้นฐาน เช่น แหล่งกำเนิด คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี การนำไปใช้ รวมถึงข้อดีและข้อเสียของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดินชนิดต่างๆ ได้แก่ หินภูเขาไฟ ทรายหยาบ โยหิน เพอร์ไลต์ เวอร์มิคูไลต์ เม็ดดินเผา ฟิต ขี้เถ้าแกลบ ขี้เลื่อย และขุยมะพร้าว เป็นต้น (ตารางที่ 2.3) นอกจากนี้ ยังมีวัสดุปลูกหรือเครื่องปลูกชนิดอื่นที่ใช้แทนดิน เช่น ออสมันดา เป็นวัสดุธรรมชาติที่ได้มาจากรากของเฟิร์นชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในป่าของประเทศไทย จัดเป็นวัสดุปลูกที่ดีที่สุด แต่มีราคาค่อนข้างแพง ออสมันดานี้สามารถใช้ปลูกเลี้ยงกล้วยไม้ได้เจริญงอกงามสม่ำเสมอใช้ปลูกกล้วยไม้ได้ตั้งแต่ต้นขนาดเล็กถึงต้นขนาดใหญ่ มีอายุการใช้งานนาน 2-3 ปี แต่มีข้อเสียคือ มักมีตะไคร่น้ำขึ้นบริเวณผิวหน้าภายใต้ความชื้นสูง อีกทั้งยังเกิดเชื้อราขึ้นได้โดยง่าย [5] อิทธิสุนทร

นันทกิจ (2011) ได้เสนอแนะวัสดุปลูกแทนดินที่เหมาะสมกับประเทศไทยว่า ควรเป็นวัสดุปลูกจำพวกวัสดุอินทรีย์ต่างๆที่สามารถหาได้ในท้องถิ่น เช่น แกลบสด ขี้เถ้าแกลบ ขุยมะพร้าว ฟีท และทราย แต่ต้องปรับสภาพรวมทั้งการหาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมก่อนนำมาใช้ นอกจากนี้ควรมีการพัฒนาวัสดุปลูกชนิดใหม่ในระดับโรงงานอุตสาหกรรม เช่น วัสดุเม็ดดินเผาและฟองน้ำอัดแห้ง ยังไม่มีการผลิตเป็นการค้าในประเทศไทย แต่อาจสามารถผลิตได้ในประเทศ เนื่องจากเป็นวัสดุปลูกที่มีการใช้เป็นจำนวนมากอันหนึ่งในต่างประเทศ โดยเฉพาะกับไม้ประดับในกระถาง เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน

วัสดุปลูก	แหล่งกำเนิด	คุณสมบัติกายภาพ เคมี	การนำไปใช้	ข้อดีและข้อเสีย
หินภูเขาไฟ Pumice	หินภูเขาไฟ	- pH 6.5 - คุณสมบัติในการอุ้มน้ำประมาณร้อยละ 19 โดยน้ำหนัก - ไม่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุ - ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 0.7-1.0 g/cm³ - ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ 3-15 mm - ความพรุนประมาณร้อยละ 73 - ความคงทนของโครงสร้างดีมาก	วัสดุเพาะกล้า วัสดุปลูกเดี่ยว วัสดุผสมกับวัสดุอื่น อายุการใช้งานนาน	ข้อดี -มีการระบายอากาศดีมาก -ราคาถูก(ใกล้เคียงผลิต) -ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายธาตุอาหาร -ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคและแมลง -ทำการฆ่าเชื้อโรคและแมลงได้ง่าย ข้อเสีย -อุ้มน้ำได้น้อย -มีน้ำหนักมาก
ทรายหยาบ Coarse sand	ชายทะเลหรือแม่น้ำ	- คุณสมบัติในการอุ้มน้ำค่อนข้างดี - ไม่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุ - ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 1.5-1.8 g/cm³ - ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ 0.5-2 mm - ความพรุนต่ำ - ความคงทนของโครงสร้างดี	วัสดุเพาะชำ วัสดุปลูก วัสดุปรับปรุงดิน อายุการใช้งานนาน	ข้อดี -ความสามารถอุ้มน้ำดีกว่ากรวด -เป็นสารเฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาเคมี ข้อเสีย -มีการอัดตัวแน่นอาจมีปัญหาคการระบายน้ำและอากาศ -มีน้ำหนักมาก -มีความพรุนต่ำ

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน (ต่อ)

วัสดุปลูก	แหล่งกำเนิด	คุณสมบัติกายภาพ เคมี	การนำไปใช้	ข้อดีและข้อเสีย
ใยหิน Rock wool	ผลิตในโรงงาน อุตสาหกรรม โดยการหลอม หินภูเขาไฟ และทำให้เป็น เส้นใยและ ผสมด้วย สารเรซินร้อยละ 4-5 โดย น้ำหนัก	● pH 7.0-9.5 ● คุณสมบัติในการอุ้มน้ำ โดยเฉลี่ยร้อยละ 70-80 โดยปริมาตร ● ไม่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุ ● ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 0.08 g/cm^3 ● ความพรุนร้อยละ 95 ● ความคงทนของโครงสร้างไม่ดี ● ปริมาณอากาศหลังจากทำให้ชุ่มน้ำและปล่อยให้บางส่วนเกินไหลออกร้อยละ 6	ใช้เพาะกล้า สามารถปลูกได้ เพียง 2-6 ครั้ง	● ข้อดี -เป็นวัสดุที่มีการระบายน้ำและอากาศดีที่สุดใน -การใช้งานง่ายน้ำหนักเบา -ฆ่าเชื้อโรคและแมลงได้ง่าย ● ข้อเสีย -ราคาแพง
เพอไลต์ Perlite	ผลิตในโรงงาน อุตสาหกรรม โดยการเผา Perlite ที่มี ต้นกำเนิดจาก เขาไฟที่ อุณหภูมิ $1,200^\circ\text{C}$	● pH 7.0-7.2 ● คุณสมบัติในการอุ้มน้ำ 250-300 ลิตรน้ำต่อเพอไลต์ 1 ลูกบาศก์เมตร ● ไม่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุ ● ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง $0.075-0.08 \text{ g/cm}^3$ ● ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ 1.5-6 mm ● ความพรุนร้อยละ 97 ● ปริมาณอากาศหลังจากทำให้ชุ่มน้ำและปล่อยให้บางส่วนเกินไหลออกร้อยละ 56.8 ● ความคงทนของโครงสร้างดี	ใช้เป็นวัสดุเพาะ ชำและวัสดุปลูก อายุการใช้งาน 1 ครั้ง	● ข้อดี -น้ำหนักเบา -ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรคและแมลง -สามารถอุ้มน้ำได้ดี ● ข้อเสีย -สลายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กและเกิดการอัดตัวกันแน่น -ราคาค่อนข้างแพง

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน (ต่อ)

วัสดุปลูก	แหล่งกำเนิด	คุณสมบัติกายภาพ เคมี	การนำไปใช้	ข้อดีและข้อเสีย
เวอมิคูไลท์ Vermiculite	เกิดจากการ เผาแร่ไมก้าที่ อุณหภูมิ ประมาณ 850 °C	• pH 7.0-7.2 • คุณสมบัติในการอุ้มน้ำ 350-375 ลิตร/ลูกบาศก์เมตร • คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุ 65-140 Cmol(e)/kg • ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 0.9-0.14 g/cm³ • ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ร้อยละ 95 ใหญ่กว่า 3 mm (1-6 mm) • ความพรุนร้อยละ 96 • ความคงทนของโครงสร้างไม่ดี • ปริมาณอากาศหลังจากทำให้ชุ่มน้ำและปล่อยให้บางส่วนเกินไหลออกร้อยละ 40	ใช้เป็นวัสดุเพาะ ชำ ใช้เป็นวัสดุปลูก อายุการใช้งาน 1-2 ครั้ง	● ข้อดี - น้ำหนักเบา - ไม่เป็นแหล่งสะสมโรคและแมลง - มีความสามารถอุ้มน้ำดีมาก ● ข้อเสีย - ลายตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้เร็ว และเกิดการอัดตัว - ราคาแพง - ฆ่าเชื้อโรคและแมลงได้ยากเมื่อจะนำกลับมาใช้ใหม่ - มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้
เม็ดดินเผา Expanded clay	การเผาเม็ดดิน เหนียวที่ อุณหภูมิสูง (1,100 °C)	• pH 5.0-7.0 • คุณสมบัติในการอุ้มน้ำร้อยละ 14.7-16.5 โดยน้ำหนัก • ไม่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุ • ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 0.3-0.6 g/cm³ • ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ 8-16 mm • ความพรุนดี • ความคงทนของโครงสร้างดีมาก	ใช้เป็นวัสดุปลูก อายุการใช้งาน หลายปี	● ข้อดี - มีการระบายอากาศดีมาก - ราคาถูกถ้าอยู่ใกล้แหล่งผลิต - ไม่ทำปฏิกิริยากับสารละลายธาตุอาหาร - ไม่เป็นแหล่งสะสมของโรค - ฆ่าเชื้อโรคและแมลงได้ง่าย - อายุการใช้งานนาน ● ข้อเสีย - อุ้มน้ำได้น้อย - มีน้ำหนักมาก

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน (ต่อ)

วัสดุปลูก	แหล่งกำเนิด	คุณสมบัติกายภาพ เคมี	การนำไปใช้	ข้อดีและข้อเสีย
พีท Peat	การสะสมของ ซากพืชตาม ธรรมชาติ	● pH 2.5-7.0 ● คุณสมบัติในการอุ้มน้ำ 4-15 เท่าของน้ำหนัก ● ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้ง 162-333 kg/cm³ ● ความพรุนร้อยละ 85-95 ● มีการสลายตัวของโครงสร้าง	ใช้ทำแท่งเพาะชำ ใช้เป็นวัสดุปลูก ใช้เป็นสาร ปรับปรุงดิน อายุการใช้งาน 2-3 ครั้ง	● ข้อดี -มีความสามารถในการอุ้มน้ำดีมาก ● ข้อเสีย -ต้องมีการปรับค่า pH -ถ้าปล่อยให้แห้งจะทำให้ขึ้นใหม่ได้ยากมาก -กำจัดโรคและแมลงได้ยาก -สลายตัวเร็วขณะปลูก -องค์ประกอบไม่แน่นอน
ขุยมะพร้าว Coconut husk		● pH 6.0-7.0 ● คุณสมบัติในการอุ้มน้ำดีมาก จนอาจมีปัญหาเกี่ยวกับการระบายอากาศ ● คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุมีค่าสูง ● ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้งต่ำ ● ความพรุนสูง ● สามารถสลายตัวได้	ใช้ทำปุ๋ยหมัก ใช้เป็นวัสดุปลูก อายุการใช้งาน 2-3 ครั้ง	● ข้อดี -น้ำหนักเบา -ความสามารถในการอุ้มน้ำดีมาก -ราคาถูก ● ข้อเสีย -อาจมีปัญหาเกี่ยวกับการระบายอากาศที่รากพืช -มีการสลายตัวและเกิดการอัดตัวแน่น -ยากในการกำจัดโรคและแมลง
ขี้เลื่อย Sawdust	โรงเลื่อย มี ความแตกต่าง กันตามชนิด ของไม้	● pH 4.2-6.0 มีความแปรปรวนมาก ● คุณสมบัติในการอุ้มน้ำดีมาก จนอาจมีปัญหาเกี่ยวกับการระบายอากาศ ● คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุมีค่าสูง ● ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้งต่ำ ● ความพรุนสูง ● สามารถสลายตัวได้	ใช้ทำปุ๋ยหมัก ใช้เป็นวัสดุปลูก อายุการใช้งาน 2-3 ครั้ง	● ข้อดี -น้ำหนักเบาต่อการนำมาใช้ -ความสามารถในการอุ้มน้ำดีมาก -ราคาถูก ● ข้อเสีย -ต้องเสียเวลาในการปล่อยให้สลายตัวนาน -มีความแปรปรวนในด่างองค์ประกอบมาก -มีการสลายตัวหลังจากนำมาใช้และเกิดการอัดตัวแน่น -ยากในการกำจัดโรคและแมลง

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลพื้นฐานของวัสดุปลูกที่ใช้แทนดิน (ต่อ)

วัสดุปลูก	แหล่งกำเนิด	คุณสมบัติกายภาพ เคมี	การนำไปใช้	ข้อดีและข้อเสีย
ซีเถ้าแกลบ Rice hull	โรงสีข้าว	● pH 7.0-8.5 มีความแปรปรวนมาก ● คุณสมบัติในการอุ้มน้ำดี ● ความหนาแน่นรวมเมื่อแห้งต่ำ ● ความพรุนสูง ● ความคงทนของโครงสร้างดี มีการสลายตัวน้อย แต่จะมีการอัดตัวบ้างหลังปลูก	ใช้เป็นวัสดุปลูกอายุการใช้งาน 2-4 ครั้ง	● ข้อดี -น้ำหนักเบาต่อการนำมาใช้ -ความสามารถในการอุ้มน้ำดี -มีการสลายตัวหลังใช้น้อยและเกิดการอัดตัวไม่มากนัก -ราคาถูก ● ข้อเสีย -ยากในการกำจัดโรคและแมลง -ต้องปรับค่า pH ก่อนใช้

ที่มา: อิทธิสุนทร นันทกิจ www.kmitl.ac.th (2011)

2.4 ปุ๋ยละลายช้า (Slow release fertilizer)

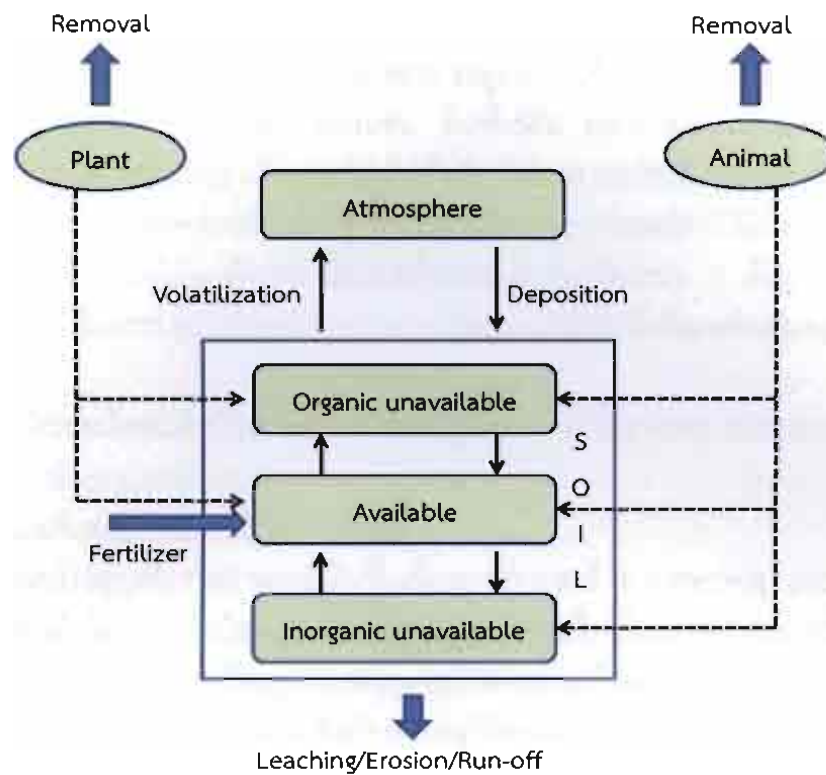
จากปัญหาการใช้ปุ๋ยเคมีที่มักเกิดการสูญเสีย (>30%) ไปโดยการชะล้าง (leaching process) หรือการเปลี่ยนรูปที่พืชไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ (unavailable forms) หรือการสูญเสียสู่ชั้นอากาศ (volatilization) ดังแผนภูมิที่ 2.2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกธาตุอาหารหลัก (N-P-K) ทำให้มีการคิดค้นพัฒนาวิธีที่จะรักษาระดับธาตุอาหารต่าง ๆ ไว้ให้มีปริมาณที่มากพอและนานพอที่พืชต้องการและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ โดยให้ปุ๋ยค่อยๆ ละลายออกมาช้าๆ เพื่อลดความสูญเสียดังกล่าว

2.4.1 นิยามของปุ๋ยละลายช้า

คำว่า ปุ๋ยละลายช้า ถึงแม้ในประเทศไทยจะมีการเรียกชื่อในภาษาอังกฤษหลายชื่อ ได้แก่ Slow-release fertilizer หรือ Delayed release fertilizer หรือ Controlled release fertilizer ซึ่งรวมหมายถึง ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาอย่างช้าๆ อย่างไรก็ตาม ынยุทธ โอสธสภ และคณะ (2551) ได้ให้นิยามความหมายของศัพท์ที่แตกต่างกันระหว่างคำว่าปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer) และปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled release fertilizer) ดังนี้ (ภาพที่ 2.11)

1) ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (Slow release fertilizers, SRF)

หมายถึงชนิดปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป เช่น ปุ๋ยยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea-formaldehyde) ปุ๋ยชนิดนี้ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้น และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น



แผนภูมิที่ 2.2 วัฏจักรธาตุอาหารในระบบเกษตรกรรม
ที่มา: ดัดแปลงจาก www.regional.org.au (2011)

2) ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled fertilizers, CRF)

หมายถึงชนิดปุ๋ยที่มีกลไกสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ เช่น ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizers) ซึ่งทราบปัจจัยที่มีผลต่ออัตราและช่วงเวลาที่ยุ่่นั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหาร อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.11 Slow and controlled release Urea fertilizer (Sulphur Coated Urea)

ที่มา: www.tradenote.net (2011)

2.4.2 คุณสมบัติของปุ๋ยละลายช้า

ปุ๋ยละลายช้าประมาณร้อยละ 65 ของทั้งหมด จะถูกนำไปใช้กับพืชในเรือนเพาะชำ และไม้กระถาง สำหรับพืชที่ปลูกในกระถาง เช่น ไม้ดอกไม้ประดับ ต้นพันธุ์ส้ม กล้าปาล์มน้ำมันและกล้าไม้โตเร็ว [21] เนื่องจากภายในกระถางมีเครื่องปลูกหรือมวลของดินจำกัด ไม่สามารถกักเก็บความชื้นได้นาน จำเป็นต้องรดน้ำค่อนข้างบ่อย จึงมีการชะล้างค่อนข้างสูงทำให้สูญเสียธาตุอาหารหลัก ดังนั้นการใช้ปุ๋ยละลายช้าที่สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชเหล่านั้นได้สม่ำเสมอและต่อเนื่องกว่า จึงถูกแทนที่การใช้ปุ๋ยเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตาม ในการใช้ประโยชน์เราควรทราบถึงคุณสมบัติทั้งข้อดีและข้อเสียของการใช้ปุ๋ยละลายช้า ดังนี้ [21,24]

- 1) เป็นประโยชน์ต่อพืชตลอดช่วงการเจริญเติบโต ทั้งนี้จะค่อยๆ ละลายธาตุอาหารออกมาทีละน้อยอย่างสม่ำเสมอ
- 2) ลดต้นทุนค่าแรงงานในการผลิตพืช
- 3) ลดการสูญเสียธาตุอาหารที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชะล้าง (leaching process) โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน จึงมีส่วนช่วยบรรเทาปัญหาการปนเปื้อนไนเตรท (Nitrate) ในแหล่งน้ำใต้ดิน
- 4) ลดกระบวนการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารจากสารอนินทรีย์ไปเป็นสารอินทรีย์ (immobilization) ในดิน ซึ่งเป็นสาเหตุให้พืชไม่สามารถนำธาตุอาหารไปใช้ได้
- 5) ลดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (nitrification) ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและลดการสูญเสียไนโตรเจนก๊าซในรูปของ ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide) และ ไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) จึงมีส่วนช่วยบรรเทาปัญหาโลกร้อนจากการสะสมตัวของก๊าซไนตรัสออกไซด์และไนตริกออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ
- 6) ลดปริมาณการสะสมของเกลือที่มากเกินไป ซึ่งจะส่งผลทำลายเมล็ดและต้นกล้า
- 7) ลดความเสี่ยงความเป็นพิษและอาการใบไหม้ของพืช เนื่องจากการใส่ปุ๋ยครั้งเดียวที่บริเวณผิวดินเป็นจำนวนมาก
- 8) ต้นทุนในการผลิตปุ๋ยละลายช้าค่อนข้างสูง (มีการเพิ่มสารอื่นที่ไม่ใช่ธาตุอาหารลงไปปุ๋ย) ทำให้ปุ๋ยละลายช้ามีราคาแพงกว่าปุ๋ยเคมีหลายเท่าตัว
- 9) ประสิทธิภาพการปลดปล่อยธาตุอาหารภายใต้สภาวะการใช้งานจริง อาจไม่เป็นไปตามที่คาดหวังเนื่องจากผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความแปรปรวนของอุณหภูมิและความชื้นในดิน ค่า pH ของดินที่มีผลต่อการขับสารอินทรีย์ออกจากรากพืช (root exudation) และ กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น

2.4.3 ชนิดของปุ๋ยละลายช้า

ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ (2551) ได้จำแนกชนิดของปุ๋ยละลายช้าตามองค์ประกอบและกระบวนการผลิตออกเป็น 3 ประเภท คือ

1) สารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ

(Organic-N low solubility compounds)

ปุ๋ยประเภทนี้จัดเป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ 1) ชนิดสารประกอบที่เกิดจากการควบแน่น (condensation) ระหว่างยูเรียกับอัลดีไฮด์ (Aldehyde) เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งสลายตัวด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ 2) ชนิดสารประกอบอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่สลายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี เช่น ไอโซบิวทิลไดตินไดยูเรีย (Isobutylidenediurea, IBDU) สำหรับองค์ประกอบทางเคมีเปอร์เซ็นต์ในโตรเจนในปุ๋ย และสภาพละลายน้ำได้ของปุ๋ยแต่ละชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

1.1) Urea formaldehyde condensation products (UF) เกิดจากการควบแน่นระหว่างยูเรียและฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นสารประกอบที่เรียกว่ายูเรียฟอร์ม (Ureaform) ซึ่งละลายน้ำอย่างช้าๆ สารประกอบนี้อาจจะอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลว โดยปรกติยูเรียฟอร์มจะมีไนโตรเจนร้อยละ 37-40 [21,24]

1.2) ไอบูติยู (Isobutylidene diurea, IBDU) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างยูเรียกับไอโซบิวทิลแอลดีไฮด์ (Isobutylaldehyde) สารประกอบที่ได้มีไนโตรเจนร้อยละ 31 ซึ่งส่วนมากไม่ละลายน้ำ สารประกอบ IBDU จัดเป็นปุ๋ยในโตรเจนละลายช้าชนิดหนึ่ง เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจึงปลดปล่อยไนโตรเจนออกมา มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไนโตรเจนทั้งหมดร้อยละ 32 ละลายน้ำได้เพียง 0.01 ถึง 0.1 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 8-12 สัปดาห์ และการปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยเกิดจากการแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis) ดังนั้น อัตราการปลดปล่อยจึงขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดปุ๋ย (ยังมีขนาดเม็ดปุ๋ยละเอียดจะทำให้การละลายเพิ่มขึ้น) ความชื้นของดินเป็นหลัก นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่า pH และอุณหภูมิของดิน [21,24]

1.3) ซีติยู (Crotonylidene diurea, CDU) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างยูเรียกับแอซีตัลดีไฮด์ โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารประกอบมีโครงสร้างเป็นวงแหวน มีไนโตรเจนร้อยละ 32 สำหรับการปลดปล่อยไนโตรเจนนั้นใช้กลไก 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาแยกสลายด้วยน้ำและการสลายโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ดังนั้นอัตราการปลดปล่อยของธาตุอาหารจึงขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดปุ๋ย ค่า pH อุณหภูมิ และความชื้นของดิน [21,24]

2) ปุ๋ยที่มีสิ่งกีดขวางทางฟิสิกส์ (Physical barrier)

ปุ๋ยประเภทนี้มีลักษณะเป็นเม็ดที่มีสารเคลือบโดยรอบ เช่น การเคลือบด้วยพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymers) หรือเป็นวัสดุพื้น (matrices) ซึ่งสารเคลือบจะเคลือบปุ๋ยไว้หลายชั้นมีปุ๋ยกระจายอยู่ภายใน วัตถุประสงค์หลักเพื่อควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร ดังนั้นจึงจัดเป็นปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (CRF) สำหรับปุ๋ยกลุ่มที่มีสารเคลือบยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) เคลือบผิวเม็ดด้วยพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกเรซิน (resins) และ 2) เคลือบผิวเม็ดด้วยอินทรีย์สาร เช่น กำมะถัน สำหรับปุ๋ยที่เคลือบโดยใช้วัสดุพื้น (matrix-based slow release fertilizers) นั้น สารที่ใช้เป็นวัสดุพื้นยังแบ่งเป็นสารไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิโอเลฟิน (Polyolefines) ยาง และไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ต่ำบางชนิด

ชื่อ	สารประกอบในปุ๋ย	ไนโตรเจน (%)	สภาพละลายได้ (ก./น้ำ 100 ก.)
Ureaform	urea formaldehyde มีสารต่อไปในปุ๋ย	37 – 40	
	Urea	46.65	100
	Methylene diurea	42.41	2.18
	2 Methylene 3 urea	41.16	0.14
	3 Methylene 4 urea	40.56	0.01
	4 Methylene 5 urea	40.21	น้อย
Urea Z	urea acetaldehyde	31 – 35	ประมาณ 4
	Ethylene diurea	38.34	
	2 ethylene 3 urea	36.19	
CDU	urea acetaldehyde	32.54	0.12
IBDU	urea isobutyraldehyde	32.16	0.01 – 0.10

ที่มา: ยงยุทธ โอสดสภา และคณะ (2551)

- 2.1) ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน (Sulfur coated urea หรือ SCU) ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดนี้มีไนโตรเจน 35% และธาตุไนโตรเจนจากเม็ดปุ๋ยจะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้นั้นสารซัลเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนเม็ดปุ๋ยจะต้องสลายตัวเสียก่อน จึงจะทำให้ยูเรียละลายและปลดปล่อยไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา การสลายตัวของสารซัลเฟอร์ที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยยูเรีย เป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสิ่งมีชีวิต (biological oxidation) และการสลายตัวทางกายภาพ (physical breaking) [21]
- 2.2) ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบหับด้วยพอลิเมอร์ (Polymer coating of SCU) เป็นการพัฒนาการเคลือบปุ๋ยยูเรีย โดยการเคลือบหับด้วยพอลิเมอร์อินทรีย์พวกเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือเรซิน (resin) เพิ่มอีกชั้นหนึ่ง ปุ๋ยเคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบหับด้วยพอลิเมอร์เรียกว่า PSCU (Polymer coated SCU) ซึ่งให้สมบัติด้านควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารและเพิ่มความทนทานต่อการขัดสี (attrition resistance) ระหว่างเม็ดปุ๋ยดีกว่าปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถัน (SCU) เพียงชั้นเดียวค่อนข้างมาก
- 2.3) ปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์อินทรีย์ (Fertilizers coated with organic polymers) ได้แก่ Osmocote, Trikot, Polyon, Duration, ESN ปุ๋ยไนโตรเจนประเภทนี้ ธาตุอาหารจากเม็ดปุ๋ย จะละลายผ่านสารพอลิเมอร์ที่เคลือบเม็ดปุ๋ยออกมาโดยอัตราการซึมแพร่ออกมานั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบ ชนิดของพอลิเมอร์ กระบวนการในการเคลือบ และอุณหภูมิดิน สามารถจำแนกออกเป็น (1) ปุ๋ยเคลือบด้วยเรซิน (Resin coated fertilizers) หรือเรซินสังเคราะห์ และ (2) ปุ๋ยเคลือบ

ด้วยเทอร์มอพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer coated fertilizers) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) สำหรับเรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยเป็นสารเคลือบพวกที่ละลายตัวเมื่อเกิดความร้อน (thermostatic resin) ปุ๋ยที่อยู่ภายในผิวเคลือบเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำง่าย โดยส่วนใหญ่จะเป็นปุ๋ยยูเรียหรือปุ๋ยเชิงประกอบ ดังนั้นปัจจัยหลักที่ควบคุมอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ย คือ อุณหภูมิ ไม่ขึ้นกับความชื้นของดิน ค่า pH และกิจกรรมของจุลินทรีย์ การปลดปล่อยธาตุอาหารจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น [21]

3) สารประกอบอนินทรีย์ที่มีสภาพละลายน้ำต่ำ

(Inorganic- low solubility compounds)

ปุ๋ยประเภทนี้เป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF) เช่น แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) หินฟอสเฟตที่ทำปฏิกิริยากับกรดบางส่วน (partially acidulated phosphate rock) และโปแตสเซียมละลายช้า (controlled release potassium fertilizers) โดยทำให้อนุภาคใหญ่ขึ้นเพื่อให้เกิดการละลายช้าเป็นวิธีการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ โดยทางอ้อม [21,24]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Escoba และคณะ (2004) ศึกษาเปรียบเทียบผลการเพาะปลูกต้นมะกอก (Olive) และปัญหาการชะล้างระหว่างการใช้ปุ๋ยทั่วไปและปุ๋ยปลดปล่อยช้า พบว่าที่ความเข้มข้นของปุ๋ย 0.75 g-N การเจริญเติบโตของพืชไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างปุ๋ยทั้งสองชนิด แต่การเจริญเติบโตจะสูงกว่าและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้นของปุ๋ย 2 g-N โดยเฉพาะปุ๋ยปลดปล่อยช้า การสูญเสียธาตุอาหารในน้ำชะส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไนเตรท และพบว่าการใช้ปุ๋ยปลดปล่อยช้าส่งผลให้การสูญเสียไนโตรเจนทั้งหมดจากกระบวนการชะล้างลดลง

Jolanun, B. and S. Towprayoon (2010) ได้รายงานผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของรูปแบบ (ชนิดต้น/ชนิดกลวง) ของวัสดุเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้นต่อประสิทธิภาพการหมัก พบว่าวัสดุเม็ดชนิดกลวงมีความเหมาะสมกว่าวัสดุเม็ดชนิดตันและส่งผลต่อระบบการหมักอย่างมีนัยสำคัญ โดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ในหมอมของการสูญเสียมวลแห้ง (14-26%) มีค่าสูงกว่าวัสดุเม็ดชนิดตันและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ผลศึกษาพฤติกรรมจลนศาสตร์และการหายใจของปุ๋ยหมักบ่งชี้ว่า อัตราส่วนผสมวัสดุเม็ดชนิดใหม่ (ชนิดกลวง) ที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตร เป็นค่าที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มีค่าสูงสุด ($k = 0.005 \text{ วัน}^{-1}$) นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) บ่งชี้ว่าวัสดุเม็ดชนิดใหม่ที่พัฒนาขึ้น สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในการต่อเชื้อจุลินทรีย์ให้แก่ระบบการหมักได้อีกแนวทางหนึ่ง

Khan M.A. และคณะ (2008) พัฒนาปุ๋ยละลายช้าจากเศษกระดาษและปุ๋ยยูเรียโดยชุบก้อนกระดาษอัดด้วยสารละลายยูเรียและผ่านกระบวนการทำให้แห้ง ผลทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหาร N โดยศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการชะล้างภายใต้สภาวะการใช้น้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์ พบว่าภายใต้สภาวะสารละลายดินสังเคราะห์เกิดขึ้นสูงกว่าสภาวะการใช้น้ำกลั่นในช่วง 120 ชั่วโมงแรกของการ

ทดสอบ หลังจากนั้นการปลดปล่อยธาตุ N จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง (720 hrs)

Khan M.A. และคณะ (2008) พัฒนาปุ๋ยละลายช้าจากถ่านไม้ (Oak) ผลทดสอบการปลดปล่อยธาตุอาหาร N P K โดยศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการชะล้างภายใต้สภาวะการใช้น้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์ทั้งแบบการไหลต่อเนื่องและแบบแบทช์ พบว่าแนวโน้มการปลดปล่อย N P K ภายใต้สภาวะสารละลายดินสังเคราะห์เกิดขึ้นสูงกว่าสภาวะการใช้น้ำกลั่น และการปลดปล่อยธาตุ N P K เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง (360 hrs)

Pickering และคณะ (2002) ศึกษาการประยุกต์ใช้ ซีโอไลต์/หินฟอสเฟต (zeolite/rock phosphate) เป็นปุ๋ยปลดปล่อยช้าสำหรับพืชไม้กระถาง พบว่าการผสม NH_4^+ -zeolite และหินฟอสเฟตเข้าด้วยกัน ช่วยส่งเสริมให้พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหาร P ทางรากได้นานมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์/หินฟอสเฟตร่วมกัน ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้หินฟอสเฟตเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชเพียงชนิดเดียว

Prasithichokekul และคณะ (2005) รายงานการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานไฟฟ้าในการผลิตวัสดุปลูกพืชเซรามิก พบว่าวัสดุเซรามิก (800°C) ที่เตรียมขึ้นจากอัตราส่วนผสมของเถ้าหนัก (กันเตา): ยิบซัม: ดินเหนียว เท่ากับ 23:8:46 และผสมด้วยซีลีอรร้อยละ 23 มีคุณสมบัติการดูดซึมน้ำดี มีค่าความเป็นกรดเล็กน้อย แต่มีน้ำหนักมากและค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำ

Wu และคณะ (2008) ศึกษาคุณสมบัติของปุ๋ยปลดปล่อยช้า (N P K) ที่ผ่านการเคลือบสองชั้นด้วย cross-linked poly (acrylic acid)/diatomite-containing urea (เคลือบภายนอก) และเคลือบภายในด้วย chitosan พบว่าปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าอุ้มน้ำสูงสุดประมาณร้อยละ 10.68 และสัดส่วนการปลดปล่อยธาตุอาหารมีค่าประมาณร้อยละ 75 ที่ระยะเวลา 30 วัน การวิเคราะห์สัณฐานด้วยเครื่อง SEM บ่งชี้ว่าโครงสร้างพื้นผิวของปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่พัฒนาขึ้นมีความหยาบและความพรุนเพิ่มสูงขึ้น

Wu และคณะ (2008) ศึกษาคุณสมบัติของปุ๋ยปลดปล่อยช้า (N P K) ที่ผ่านการเคลือบสองชั้นด้วย cross-linked poly (acrylic acid-co-acrylamide) (เคลือบภายนอก) และเคลือบภายในด้วย chitosan ปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่พัฒนาขึ้นมีธาตุอาหาร N P K เท่ากับร้อยละ 8.06, 8.14 และ 7.98 ผลการศึกษาพบว่าปุ๋ยปลดปล่อยช้ามีค่าดูดซึมน้ำสูงสุดประมาณ 70 เท่าของน้ำหนัก และสัดส่วนการปลดปล่อยธาตุอาหารมีค่าประมาณร้อยละ 75 ที่ระยะเวลา 30 วัน

กรรณิกา เตชะสกุลมาศ (2528) วิเคราะห์ดินขาลำปางพบว่าดินขาลำปางประกอบด้วย แร่เคโอลิไนต์ อิลไลต์ ควอร์ตซ์ และมัสโคไวต์ โดยมีองค์ประกอบทางเคมี คือ SiO_2 ร้อยละ 64.59-71.54, Fe_2O_3 ร้อยละ 1.60-1.94, TiO_2 ร้อยละ 0.03-0.04, Al_2O_3 ร้อยละ 17.17-29.45, CaO ร้อยละ 0.28-0.61, MgO ร้อยละ 0.19-0.25, Na_2O ร้อยละ 0.10-0.42 และ K_2O ร้อยละ 0.52-0.99

ณัฐวุฒิ จุลสงค์ (2549) ศึกษาอัตราการใช้น้ำหมักชีวภาพ (พด.2) เพื่อการปลูกหน้าวัวทางภาคใต้ตอนบน วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design จำนวน 3 ซ้ำ 6 วิธีการประกอบด้วย วิธีการจัดการแบบเกษตรกร (ใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้า) วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้าร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 500 วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้าร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 700 วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้าร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 900 วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้าร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 1,100 และวิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ย

เกร็ดและปุ๋ยละลายช้าร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 1,300 พบว่า วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้าร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 1,100 ทุก 7 วัน จะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความสูงลำต้นและค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้นที่อายุ 33 เดือนหลังปลูก รวมทั้งค่าเฉลี่ยความยาวก้านดอก ค่าเฉลี่ยความกว้างดอก และค่าเฉลี่ยจำนวนดอกตลอดการทดลอง มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 52.23 , 5.3 , 48.6 , 12.6 cm และ 7.2 ดอกต่อต้นต่อปี ตามลำดับ รองลงมาคือ วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้า ร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 900 ทุก 7 วัน วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้า ร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 1,300 ทุก 7 วัน วิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้า ร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 700 ทุก 7 วัน และวิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเกร็ดและปุ๋ยละลายช้า ร่วมกับการฉีดน้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) อัตรา 1: 500 ทุก 7 วัน ตามลำดับ ส่วนวิธีการจัดการแบบเกษตรกร (T1) ซึ่งมีวิธีการจัดการโดยใส่ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว มีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความสูงลำต้น ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางลำต้น ค่าเฉลี่ยความยาวก้านดอก ค่าเฉลี่ยความ กว้างดอก และค่าเฉลี่ยจำนวนดอก มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 37.27 , 4.0 , 38.5 , 10.0 cm และ 3.8 ดอกต่อต้นต่อปี ตามลำดับ

ตรัง เป็กทอง (2546) ศึกษาสมบัติของไส้กรองเซรามิกที่เตรียมจากไดอะทอมไมต์แหล่งลำปาง โดยทดลองเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและผงถ่านละเอียดเพื่อเพิ่มความพรุนตัว พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและผงถ่านละเอียดร้อยละ 25 และ 30 ตามลำดับ ผลลัพธ์หลังเผา (900°C) มีค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 78 เส้นผ่าศูนย์กลางรูพรุนไม่เกิน 2.6 μm ความสามารถในการซึมผ่านประมาณ 186 V/hr ที่ความดัน 3 bar และมีประสิทธิภาพในการกรองเชื้อ *E.coli* สูงถึงร้อยละ 99.99

ทิวาสวัสดิ์ ศิริโสม (2552) ศึกษาเปรียบเทียบการดัดแปรไดอะทอมไมต์โดยวิธีความร้อนและวิธีเคมี ความร้อนสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนัก พบว่าไดอะทอมไมต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว (700°C) ให้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแคดเมียมและตะกั่วได้ดีกว่ากรณีการดัดแปรด้วยเคมีความร้อนหรือไดอะทอมไมต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ธรรมชาติ) โดยไดอะทอมไมต์มีพื้นที่ผิวการดูดซับประมาณ 44.14 m^2/g ค่า pH ที่เหมาะสมและระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสม คือ pH 8 (90 นาที) และ pH 7 (70 นาที) ทั้งนี้ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าร้อยละ 85 ขึ้นไป

ธนา สมบัติพิพ (2548) ศึกษาการปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยพืชสดในชุดดินที่แตกต่างกัน 4 ชุดดินในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าในชุดดินท่าม่วงซึ่งเป็นดินรุ่มปนทราย ค่า pH ระดับความชื้นและชนิดของปุ๋ยพืชสดสัมพันธ์กับปริมาณ $\text{NH}_4\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ ที่ปลดปล่อยออกมาอย่างมีนัยสำคัญตลอดเวลาการบ่ม ชุดดินเชียงรายซึ่งเป็นดินเหนียวปนดินรุ่มและชุดดินเชียงคานซึ่งเป็นดินเหนียวพบว่า ค่า pH ระดับความชื้นและชนิดของปุ๋ยพืชสดสัมพันธ์กับปริมาณ $\text{NH}_4\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ ที่ปลดปล่อยออกมาอย่างมีนัยสำคัญบางระยะเวลาของการบ่ม สำหรับชุดดินลพบุรีซึ่งเป็นดินเหนียวพบว่า ระดับความชื้นและชนิดของปุ๋ยพืชสดเท่านั้นที่สัมพันธ์กับปริมาณ $\text{NH}_4\text{-N}$ และ $\text{NO}_3\text{-N}$ ที่ปลดปล่อยออกมาอย่างมีนัยสำคัญตลอดเวลาการบ่ม

นิศารัตน์ ทวีนุต (2546) ศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ดินต่อการย่อยสลายฟอสเฟตและการตรึงไนโตรเจนในปุ๋ยหมัก พบว่าปุ๋ยหมักที่ได้รับการใส่เชื้อแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนไม่ว่าจะใส่อย่างเดียวหรือใส่ร่วมกับเชื้อราที่ย่อยสลายฟอสเฟตมีปริมาณไนโตรเจน ไม่แตกต่างจากปุ๋ยหมักที่ไม่ได้รับการใส่เชื้อ

อย่างมีนัยสำคัญ การใส่เชื้อราย่อยสลายฟอสเฟตอย่างเดียรมีผลทำให้ปริมาณไนโตรเจน ในปุ๋ยหมักลดต่ำลงแต่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์เพิ่มสูงขึ้น และการใส่เชื้อแบคทีเรียตรึงไนโตรเจนร่วมกับเชื้อราที่ย่อยสลายฟอสเฟตให้ผลดีกว่าการใส่เชื้อราเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่กากน้ำตาลร่วมกับการใส่เชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 2 ประเภท มีผลให้ไนโตรเจนทั้งหมดและปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำกว่าเงื่อนไขไม่ใส่กากน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญ

วัชระ ยาวีไชย (2550) ผลิตเซรามิกรูปทรงสูงสำหรับการปลูกพืชโดยใช้วัสดุดิบ ดินขาว ไตอะทอไมต์ และถ่านไม้ พบว่าวัสดุปลูกที่พัฒนาขึ้นที่อัตราส่วนผสม 40:40:30 (ดินขาว:ไตอะทอไมต์:ถ่านไม้) เป็นเงื่อนไขและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุปลูก โดยเผาที่อุณหภูมิ 950°C ผลการทดสอบการปลูกกล้วยไม้สายพันธุ์ฟาแลนด์นอปซิส โดยเปรียบเทียบกับวัสดุปลูกที่เป็นถ่าน กาบมะพร้าว เพอไลต์ ไฮโดรบอล ยิบซัม และถ่านหุบกะพง พบว่าวัสดุปลูกที่พัฒนาขึ้นให้ผลดีกว่าทุกวัสดุที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบทั้งด้านการเจริญเติบโตและการออกดอก

ศรีประไพ เปลียนอนกุล (2524) รายงานผลการใช้ปุ๋ยละลายช้าและยาฆ่าแมลงชนิดเม็ดกับดาวเรืองพันธุ์โกลด์กาลอร์ พบว่าชุดการทดลองที่ใช้ปุ๋ยละลายช้าอัตรา 2 kg/m^3 และเสริมปุ๋ยใบและปุ๋ยเม็ดที่อัตรา 2 kg/m^3 ให้ผลดีกว่าชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และการใช้ยาแอลดีคาร์ร่วมกับปุ๋ยละลายช้าให้ผลดีมากในการป้องกันกำจัดไรขาว โดยสามารถควบคุมปริมาณไรขาวให้อยู่ในระดับต่ำได้นานถึงอย่างน้อย 50 วัน

สิทธิชัย ลอดแก้ว (2543) ศึกษาผลกระทบของปุ๋ยเคมี จุลธาตุ และปุ๋ยต่อผลผลิตและคุณภาพข้าวบาร์เลย์ พบว่าการใส่โดโลไมท์ที่อัตรา 70 kg/rai ให้ผลดีที่สุด นอกจากช่วยเพิ่มแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์และเพิ่มผลผลิตแล้วยังช่วยลดความเป็นพิษของแมงกานีสและเหล็ก สำหรับการฉีดพ่นปุ๋ย $0.50\%\text{KNO}_3$ ทางใบพร้อมด้วยจุลธาตุ พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตข้าวบาร์เลย์ได้สูงถึงร้อยละ 20

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในการพัฒนาขึ้นรูปเม็ดลูกดิน (clay pellet) ได้แก่ ดินขาว (China clay) และดินเบาไดอะทอมไมท์ (diatomite) จากแหล่งพื้นที่จังหวัดลำปาง ซึ่งผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรง 200 mesh ก่อนนำไปใช้ศึกษาทดลอง วัสดุขี้เลื่อย (sawdust) ที่คัดขนาดผ่านตะแกรง 80 mesh ถูกผสมเข้ากับวัสดุหลักเพื่อเพิ่มปริมาณรูพรุนของเม็ดลูกดิน และใช้ยูเรีย (urea) เป็นปุ๋ยไนโตรเจนหลัก (commercial N fertilizer) สำหรับการศึกษา (ภาพที่ 3.1)



ภาพที่ 3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา

ดินที่ใช้สำหรับการวิจัยเป็นชุดดินสันทราย (กลุ่มชุดดินที่ 22) ลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย สีน้ำตาลปนเทา จัดเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ โดยเก็บจากแปลงทดลอง ศูนย์วิจัยฝึกรอบมและสาธิตการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ระดับความลึก 5-20 ซม. จากผิวดิน (ภาพที่ 3.2) ในการเลือกใช้ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำสำหรับการทดลอง ทั้งนี้เพื่อสามารถวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินได้อย่างชัดเจน และทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ทำการศึกษา [38,39] เช่น การวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคดิน (particle size distribution/ASTM D422-63) ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity/ASTM D854) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH/pH meter) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (organic matter/wet oxidation) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N/micro kjeldahl method) ปริมาณฟอสฟอรัสที่สามารถสกัดได้ (extractable P/spectrophotometer) ปริมาณโพแทสเซียมที่สามารถสกัดได้ (extractable K/atomic absorption) และความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity/ammonium saturation and titrimetric method) เป็นต้น



ภาพที่ 3.2 การเก็บตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

(แปลงทดลองศูนย์วิจัยฝึกอบรมและสาธิตการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ระเบียบวิธีการวิจัยของการศึกษานี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ระยะหลัก โดยแต่ละระยะหลักของโครงการวิจัยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

ระยะที่ 1 การพัฒนาเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้าด้านการเกษตร

- 1.1 เตรียมวัตถุดิบ การคัดขนาด และการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัตถุดิบ
- 1.2 ศึกษารูปแบบและขนาดที่เหมาะสมของเม็ดลูกดิน ในเบื้องต้นทดลองผลิตเม็ดลูกดินขึ้นจากส่วนผสมวัตถุดิบ 3 ชนิด คือ ดินขาว: ดินเบาไดอะทอมไมท์: ขี้เลื่อย ที่อัตราส่วนผสม 40:45:15 [5] จำนวน 2 รูปแบบ คือ 1) แบบท่อนลูกบาศก์ (กxยxส) ขนาด 0.5 และ 1 cm และ 2) ทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 และ 1 cm
- 1.3 ประเมินรูปแบบและขนาดเม็ดลูกดินที่เหมาะสม เพื่อผลิตสำหรับการศึกษาในขั้นตอนต่อไป โดยการประเมินเบื้องต้นได้คำนึงถึงลักษณะทางกายภาพ ข้อจำกัดในการผลิต และค่าใช้จ่ายในการผลิต
- 1.4 ออกแบบสูตรผสมและการผลิตเม็ดลูกดิน (ภาพที่ 3.3 ก-ง) ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 1.3 ทั้งนี้ทำการออกแบบส่วนผสมจำนวน 15 สูตร (สูตรสามเหลี่ยม) โดยใช้ส่วนผสมวัตถุดิบ 3 ชนิด คือ ดินขาว ดินเบาไดอะทอมไมท์ และขี้เลื่อย และกำหนดช่วงอุณหภูมิในการทำให้แห้ง 750-800 °C (ตารางที่ 3.1)
- 1.5 ประเมินและสรุปผลการศึกษาของระยะที่ 1



(ก) การเตรียมวัตถุดิบ



(ข) การผลิตและขึ้นรูปเม็ดลูกดินชนิดท่อนลูกบาศก์



(ค) เม็ดลูกดินชนิดท่อนลูกบาศก์



(ง) การผลิตและขึ้นรูปเม็ดลูกดินชนิดทรงกลมตัน

ภาพที่ 3.3 การผลิตเม็ดลูกดิน

ตารางที่ 3.1 สูตรผสมของเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า

สูตรที่	ดินขาว	ดินเบาไดอะตอมไมท์	ซีลี้อย
1	10	75	15
2	10	60	30
3	25	60	15
4	10	45	45
5	25	45	30
6	40	45	15
7	10	30	60
8	25	30	45
9	40	30	30
10	55	30	15
11	10	15	75
12	25	15	60
13	40	15	45
14	55	15	30
15	70	15	15

หมายเหตุ: ดินขาวและดินเบาคัดขนาดผ่านตะแกรง 200 mesh
ซีลี้อยคัดขนาดผ่านตะแกรง 80 mesh

ระยะที่ 2 การศึกษาสูตรการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า

- 2.1 ประเมินสูตรการผลิตที่มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาเม็ดลูกดิน โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้น ดังนี้
- ลักษณะเนื้อดินหลังเผา
 - ค่าความเป็นกรดด่าง (pH, pH meter)
 - ค่าการหดตัว (shrinkage, ASTM C326-09)
 - ค่าการยุ่ยตัวในน้ำ (slake, ASTM C325-07)
 - ค่าการดูดซึมน้ำ (water absorption, ASTM C373-88)
 - ค่าความหนาแน่น (bulk density, ASTM 2937)
 - ค่าความแข็ง (modulus of rupture, ASTM D790)
- 2.2 คัดเลือกสูตรการผลิตที่มีความเหมาะสมในการพัฒนาเม็ดลูกดินเป็นวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า จำนวน 2 สูตร ตามเกณฑ์ที่กำหนดเบื้องต้น ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์พิจารณาคุณสมบัติวัสดุปลูก

คุณสมบัติวัสดุปลูกพืช*	ข้อพิจารณา
การดูดซึมน้ำ	ควรมีค่าการดูดซึมน้ำช่วงร้อยละ 50-80
ค่าความหนาแน่น	ควรมีค่าความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา สะดวกต่อการใช้งาน
ค่าการยุ่ยตัวในน้ำ	ไม่ควรมีการยุ่ยตัวในน้ำ
ค่าความแข็ง	มีความคงตัว สามารถรับแรงกดทับในภาชนะได้
ค่าความเป็นกรดด่าง	ควรมีค่าเป็นกลาง 6.0-7.5

หมายเหตุ: *วัชระ ยาวีไชย (2550)

ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวัสดุปลูก perlite

- 2.3 ผลิตเม็ดลูกดินตามสูตรที่ผ่านการคัดเลือกจำนวน 2 สูตร สูตรละ 2 ขนาด และทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของเม็ดลูกดินที่ผลิตขึ้น ดังนี้
- วิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของวัสดุเม็ดลูกดิน (X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)
 - พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และค่าเฉลี่ยรูพรุน (porosity by BET method)
 - ความพรุนตัวปรากฏ (porosity, ASTM C373-88)
 - สมบัติรับแรงอัด (compressive properties, ASTM D165)
 - การชะโลหะหนัก Zn, Pb, Cu, Cd, Cr, Hg (leachate extraction, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540)
 - ไนโตรเจนทั้งหมด (total N, Carbon/Nitrogen analyzer)

- ความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity, ammonium saturation and titrimetric method)
- วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานโดย Scanning Electron Microscopy (SEM)

2.4 ประเมินและสรุปผลการศึกษาของระยะที่ 2

ระยะที่ 3 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการชะล้าง

- 3.1 วางแผนและเตรียมอุปกรณ์ วัสดุ และสารเคมีสำหรับการวิจัย
- 3.2 เตรียมปุ๋ยละลายช้าจากเม็ดลูกดิน (สูตรที่ผ่านการคัดเลือก 2 สูตร) โดยมีขั้นตอนดังนี้ (ภาพที่ 3.4 ก-ค)
 - แช่วัสดุเม็ดลูกดินในสารละลายยูเรีย (Urea solution) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - นำวัสดุเม็ดลูกดินมาทำให้แห้ง โดยศึกษาเปรียบเทียบวิธีทำให้แห้ง 2 วิธี คือ 1) ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 hr และ 2) ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 hr หลังจากนั้นบรรจุวัสดุเม็ดลูกดินในภาชนะฝาปิดพร้อมใช้สำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป
- 3.3 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารของเม็ดลูกดินที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ
- 3.4 ปฏิบัติการทดลองเพื่อประเมินการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการชะล้าง (ภาพที่ 3.5) ดังแผนการทดลองในตารางที่ 3.3
- 3.5 วิเคราะห์และแปลผลข้อมูลทั้งในส่วนของพารามิเตอร์และค่าทางสถิติ
- 3.6 ประเมินและสรุปผลการศึกษาของระยะที่ 3



(ก) การเตรียมเม็ดลูกดินในสารละลาย urea ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10

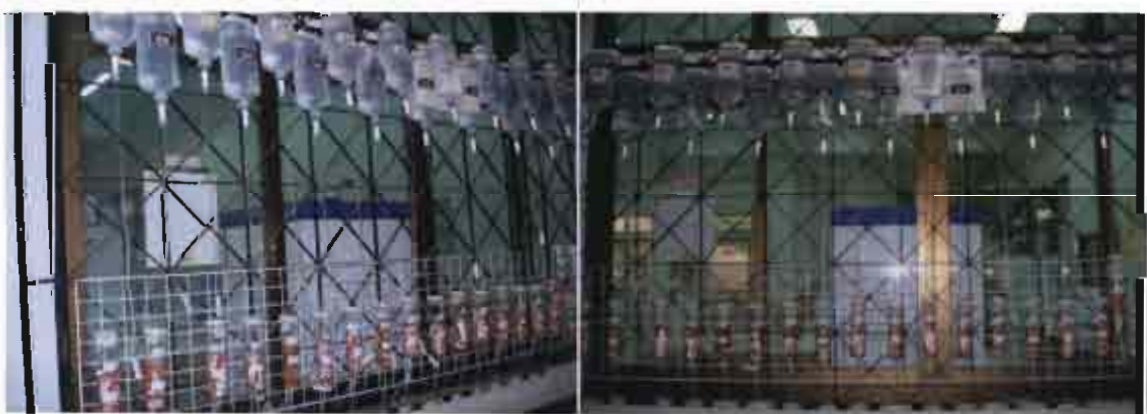


(ข) การเปรียบเทียบวิธีทำแห้งของเม็ดลูกดิน ที่อุณหภูมิ 75 ± 5 °C และที่อุณหภูมิห้อง



(ค) เม็ดลูกดินที่พร้อมใช้สำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป

ภาพที่ 3.4 การเตรียมปุ๋ยละลายช้าจากเม็ดลูกดิน



ภาพที่ 3.5 การทดลองปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการชะล้าง

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองของการศึกษาระยะที่ 3

Experiments	Formula	Drying method	Test method	Flow rate (mL/h)	Solution	Monitoring parameters
Exp.1	Opt.1*	Ambient	Continuous	100	Distilled water	pH, TN, EC at 1,3,6,9,12,24,48 72,96,120,240,360, 480,600, and 720 h
Exp.2	Opt.1*	Ambient	Continuous	100	Soil solution	
Exp.3	Opt.1*	75±5°C	Continuous	100	Distilled water	
Exp.4	Opt.1*	75±5°C	Continuous	100	Soil solution	
Exp.5	Opt.2*	Ambient	Continuous	100	Distilled water	
Exp.6	Opt.2*	Ambient	Continuous	100	Soil solution	
Exp.7	Opt.2*	75±5°C	Continuous	100	Distilled water	
Exp.8	Opt.2*	75±5°C	Continuous	100	Soil solution	
Osmocote	-	-	Continuous	100	Distilled water	
					Soil solution	
Urea	-	-	Continuous	100	Distilled water	
					Soil solution	
**Control	-	-	Continuous	100	Distilled water	
					Soil solution	

หมายเหตุ: Synthesis soil solution (5 mM CaCl_2 + 1 mM MgCl_2 + 0.25 mM KCl) (Khan et al., 2008)

*ศึกษาเปรียบเทียบเม็ดลูกดินทั้งสองขนาด (ท่อนลูกบาศก์ 0.5x0.5x0.5 และ 1.0x1.0x1.0 cm)

**เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอ้อมตัวด้วยน้ำกลั่น (control)

ค่าอัตราการไหลต่อพื้นที่ผิวที่ทดลองเท่ากับ 5 mL/hr-sq.cm

ระยะที่ 4 การศึกษาพลวัตการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ในดิน

- 4.1 วางแผนและเตรียมอุปกรณ์ วัสดุ และสารเคมีสำหรับการวิจัย
- 4.2 เตรียมดิน (ชุดดินสนทราย กลุ่มชุดดินที่ 22) โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด # 2 mm และวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ
- 4.3 ปฏิบัติการทดลอง (ภาพที่ 3.6 ก-ข) เพื่อศึกษาพลวัตการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการบ่มดินด้วยปุ๋ยละลายช้าจากเม็ดลูกดินดังแผนการทดลองในตารางที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - 4.3.1 เตรียมดินเปล่า (200g) ใส่ลงในถุง polyethylene ขนาด 4"x8" สำหรับบ่ม 6 ชุดการทดลอง (ชุดการทดลอง 3 ซ้ำ) เพื่อใช้ทดสอบในสัปดาห์ที่ 0, 1, 2, 3, และ 4 ของการบ่มดิน รวมใช้ดินจำนวน 90 ถุง มวลรวมทั้งหมด 18,000 g (200 g x 6 ชุดทดลอง x 3 ซ้ำ x 5 สัปดาห์) ทำการปรับความชื้นของดินประมาณร้อยละ 18±2 เขย่าถุงให้สม่ำเสมอ ชั่งน้ำหนักและจดบันทึก ปิดถุงให้สนิท แล้วนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 20±2 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ก่อนนำมาใช้ทดสอบร่วมกับวัสดุเม็ดลูกดิน

- 4.3.2 ตรวจสอบความชื้นของดิน (บ่มครบ 1 สัปดาห์) โดยการชั่งน้ำหนักและทำการปรับความชื้นให้คงที่ ประมาณร้อยละ 18 ± 2 หลังจากนั้นผสมเม็ดลูกดินและปุ๋ยยูเรียลงในดินตามอัตราส่วนที่กำหนด (ตารางที่ 3.4) ทั้งนี้กำหนดให้ชุดการทดลองที่ 1-5 (Exp.1-Exp.5) มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) เทียบเท่ากัน ประมาณ 2.5 mg-N/g-soil [40] และศึกษาเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (Exp.6) ภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่นของเม็ดลูกดิน หลังจากนั้นทำการเขย่าผสมกันให้ทั่วถึงและสม่ำเสมอ ชั่งน้ำหนักและจดบันทึก ปิดถุงให้สนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น และนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิประมาณ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 4 สัปดาห์
- 4.3.3 ตรวจสอบน้ำหนักของดินที่บ่มทุกสัปดาห์ (7 วัน) หากน้ำหนักลดลง ทำการปรับความชื้นให้ดินมีน้ำหนักคงที่
- 4.4 วิเคราะห์และแปลผลข้อมูลทั้งในส่วนของการพารามิเตอร์และค่าทางสถิติ
- 4.5 ประเมินและสรุปผลการศึกษาของระยะที่ 4
- 4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 3.4 แผนการทดลองของการศึกษาระยะที่ 4

Experiments	Formula	Size (mm)	Mixing ratio A:B (g/g)	Control condition	Monitoring parameters
Exp.1	Opt.1	50	25:200	-Drying method $75 \pm 5^\circ\text{C}$	Soil: %MC, pH, inorganic N ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4^+$), OM Granule: %TN at 0, 1, 2, 3, 4 week.
Exp.2	Opt.1	100	25:200	-Moisture $18 \pm 2\%$	
Exp.3	Opt.2	50	25:200	- $20 \pm 2^\circ\text{C}$ incubation	
Exp.4	Opt.2	100	25:200	-%N 0.25	
Exp.5	Urea	-	1:200		
Exp.6*	Opt.1	50	25:200		

หมายเหตุ A=เม็ดลูกดิน (ปุ๋ยละลายช้า) B=ดินที่เตรียมขึ้น
*เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น (Control)
ทุกตัวอย่างวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งในส่วนของผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลค่าทางสถิติและการทดสอบสมมติฐานปัจจัย โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) แล้วทำการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยของชุดการทดลองโดยวิธี Least Significant Difference Method (LSD) ที่ระดับนัยสำคัญทางด้านสถิติที่ 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95



(ก) การบ่มดินในตู้ควบคุมอุณหภูมิ $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$



(ข) การสกัดสารละลายจากดินเพื่อการวิเคราะห์

ภาพที่ 3.6 การทดลองพลวัตการปลดปล่อยธาตุอาหารหลัก (N) ภายใต้สภาวะการบ่มดิน

บทที่ 4

ผลดำเนินการวิจัย

4.1 การพัฒนาเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า

4.1.1 การประเมินรูปแบบการผลิตวัสดุเม็ดลูกดิน

จากการทดลองผลิตเม็ดลูกดินจากส่วนผสมวัตถุดิบ 3 ชนิด คือ ดินขาว:ดินเบา:โดอะทอไมท์:ซีลี้อยู่ที่อัตราส่วน 40:45:15 (วัชระ ยาวีไชย, 2550) เพื่อประเมินรูปแบบและขนาดที่เหมาะสมของเม็ดลูกดินในเบื้องต้นสำหรับการผลิตเพื่อใช้ศึกษาทดลองในระยะต่อไป พบว่าลักษณะเม็ดลูกดินชนิดแบบท่อนลูกบาศก์ (ภาพที่ 4.1a) ทั้งสองขนาดคือ 0.5x0.5x0.5 cm และ 1x1x1 cm (กxยxส) เป็นรูปแบบที่มีความเหมาะสมมากกว่าชนิดทรงกลมตัน (ภาพที่ 4.1b)



(a) เม็ดลูกดินทรงท่อนลูกบาศก์

(b) เม็ดลูกดินทรงกลมตัน

ภาพที่ 4.1 วัสดุเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น

ทั้งนี้เนื่องจากภายใต้สภาวะการผลิตจริง วัสดุเม็ดลูกดินชนิดท่อนลูกบาศก์จะมีความสม่ำเสมอของขนาดทางกายภาพมากกว่า การควบคุมคุณภาพการผลิตทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากสามารถใช้แบบพิมพ์ในการอัดรีดขึ้นรูปได้โดยง่าย (ภาพที่ 3.3-ข) และสามารถผลิตในปริมาณที่มากโดยเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตที่ต่ำกว่า (อัตราการผลิต ≈ 500 กิโลกรัม/วัน ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมวัตถุดิบ การเสื่อมราคา ค่าไฟ และค่าแรง ประมาณ 0.4-0.5 บาท/กิโลกรัม) ขณะที่การผลิตเม็ดลูกดินชนิดทรงกลมตันทั้งสองขนาดจำเป็นต้องขึ้นรูปด้วยมือ (ภาพที่ 3.3-ง) ทำให้อัตราการผลิตค่อนข้างต่ำกว่าภายใต้ต้นทุนที่สูง (อัตราการผลิตขึ้นกับขนาดและความประณีต ≈ 30 -50 กิโลกรัม/คน/วัน ค่าใช้จ่ายในการผลิตรวมวัตถุดิบและค่าแรงประมาณ 2-3 บาท/กิโลกรัม)

นอกจากนี้ความไม่สม่ำเสมอของขนาดเม็ดลูกดิน (ทรงกลมตัน) ที่ขึ้นรูปด้วยมือ อาจส่งผลกระทบต่อความชัดเจนในการวิเคราะห์และวินิจฉัยข้อมูลของการศึกษาในระยะต่อไป ดังนั้นเม็ดลูกดินชนิดแบบท่อนลูกบาศก์ทั้งสองขนาดคือ $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ cm และ $1 \times 1 \times 1$ cm (กxยxส) จึงเป็นรูปแบบที่ถูกเลือกสำหรับการศึกษานี้ อย่างไรก็ตาม การผลิตเม็ดลูกดินชนิดทรงกลมตันถือเป็นรูปแบบหนึ่งที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่งในการใช้งานหากมีการพัฒนาเครื่องมือในเชิงพาณิชย์ เพื่อขึ้นรูปและผลิตวัสดุเม็ดลูกดินชนิดทรงกลมตันลำดับต่อไป

4.1.2 การศึกษาสูตรผสมการผลิตวัสดุเม็ดลูกดิน

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้นกับองค์ประกอบและส่วนผสมหรือสูตรผสมของวัตถุดิบ (ดินขาว ดินเบาไดอะทอมไมท์ และซีลีเยอ) เป็นหลัก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการวิจัยละเอียดหาสูตรหรือสัดส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตเม็ดลูกดิน ในการศึกษานี้ได้แปรผันสูตรผสมที่ศึกษา (สูตรสามเหลี่ยม) รวมทั้งสิ้นจำนวน 15 สูตร การประเมินสูตรผสมในการผลิตเม็ดลูกดินมีผลดังนี้

1) การประเมินลักษณะเนื้อวัสดุ (เนื้อดิน)

จากการประเมินลักษณะเนื้อดินที่ผ่านกระบวนการผลิตทั้ง 15 สูตร (ภาพที่ 4.2) โดยเบื้องต้นกำหนดให้สูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์ควรเป็นสูตรผสมที่ให้เนื้อดินมีลักษณะปกติ มีความคงตัว ไม่แตกหักหรือยุบสลาย ผลการศึกษาพบว่าสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์เบื้องต้นมีจำนวนทั้งหมด 7 สูตร (ภาพที่ 4.3) ได้แก่ สูตรที่ 1 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=10:75:15) สูตรที่ 2 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=10:60:30) สูตรที่ 3 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=25:60:15) สูตรที่ 5 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=25:45:30) สูตรที่ 6 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=40:45:15) สูตรที่ 10 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=55:30:15) และสูตรที่ 15 (ดินขาว:ดินเบาไดอะทอมไมท์:ซีลีเยอ=70:15:15)

ทุกสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์ดังกล่าว พบว่ามีค่าการหดตัวก่อนเผาและหลังเผายู่ในช่วงร้อยละ 1.8 ± 0.07 – 4.0 ± 0.06 และร้อยละ 2.0 ± 0.12 – 4.2 ± 0.15 ตามลำดับ มีลักษณะสีส้มนวล-ส้ม-ส้มอิฐ และมีปริมาณซีลีเยอเป็นวัสดุผสมไม่เกินร้อยละ 30 ขณะที่สูตรผสมที่เงื่อนไขปริมาณของซีลีเยอสูงกว่าร้อยละ 30 พบว่าลักษณะเนื้อดินจะแตกหักและยุบสลายได้ง่ายภายหลังการเผาเป็นส่วนใหญ่ บ่งชี้ว่าปริมาณซีลีเยอเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ นอกจากอาจมีผลต่อความพรุนของเม็ดลูกดินแล้ว ยังส่งผลต่อลักษณะการเกาะตัวและความคงตัวของส่วนผสมเนื้อดินด้วยเช่นกัน (ตารางที่ 4.1)

2) การประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้น (7 สูตร)

ในการคัดเลือกหาสูตรผสมที่เหมาะสมอย่างน้อยจำนวน 2 สูตร สำหรับการผลิตเม็ดลูกดินและการศึกษาระยะต่อไป ทั้งนี้ศึกษาเฉพาะเงื่อนไขสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์ทั้ง 7 สูตรดังกล่าวข้างต้น โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลเบื้องต้น (ตารางที่ 4.2) สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกพืชตามเกณฑ์ที่กำหนด

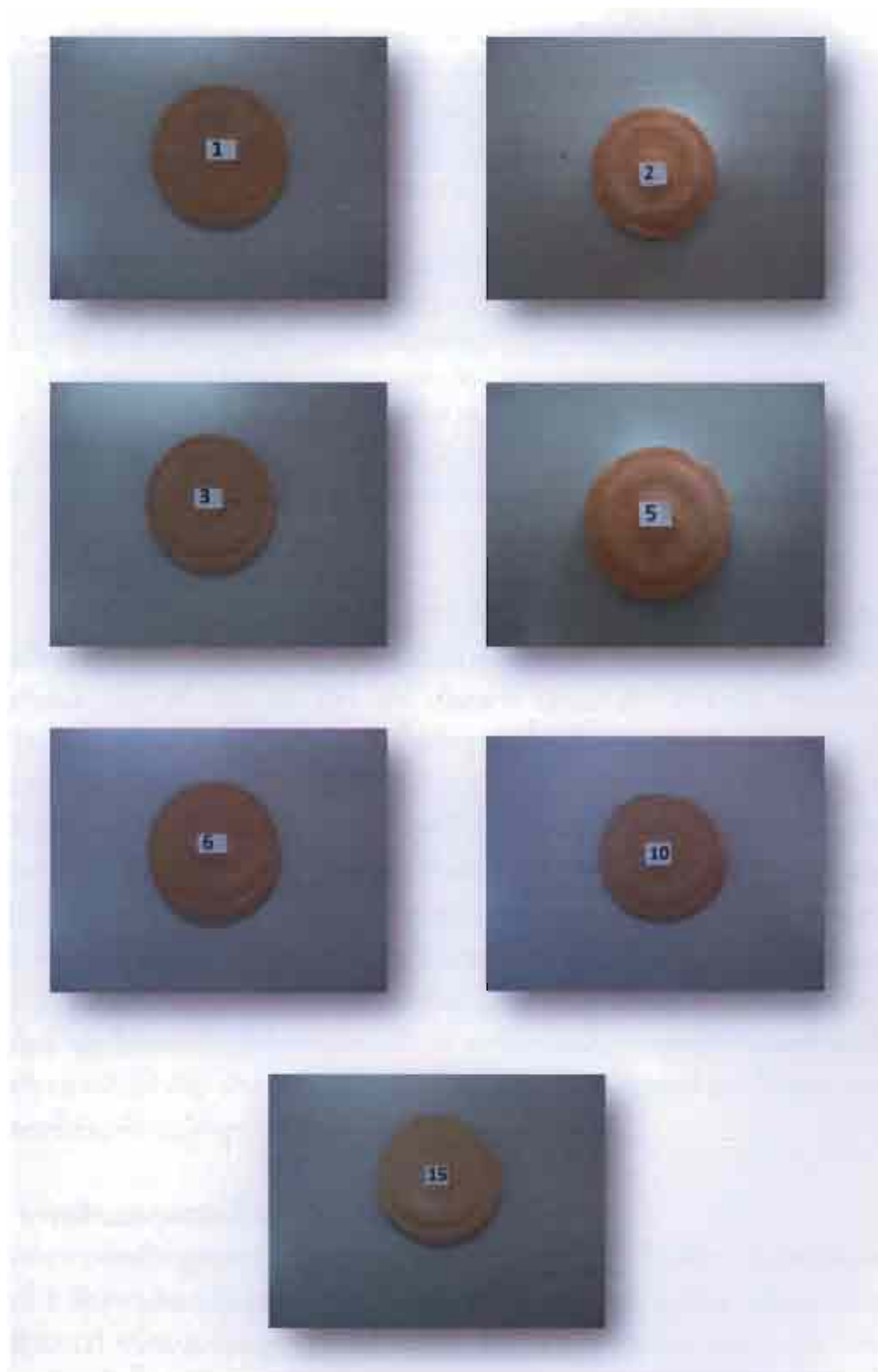
ตารางที่ 4.1 ลักษณะเนื้อดิน สี และการหดตัวของวัสดุผสม

สูตรที่	ดินขาว	โคอะทอมไมท์	ซีลี้อย	การหดตัว (%)		ลักษณะสี	ลักษณะเนื้อดิน
				ก่อนเผา	หลังเผา		
1	10	75	15	4.0±0.06	4.2±0.15	ส้มอิฐ	ปกติ
2	10	60	30	2.6±0.10	4.2±0.08	ส้มอิฐ	ปกติ
3	25	60	15	3.2±0.15	4.2±0.12	ส้มอิฐ	ปกติ
4	10	45	45	3.0±0.05	3.6±0.10	ส้ม	ยุ่ยสลาย
5	25	45	30	3.2±0.06	3.4±0.10	ส้ม	ปกติ
6	40	45	15	3.2±0.15	3.2±0.06	ส้ม	ปกติ
7	10	30	60	2.4±0.07	5.6±0.12	ส้มแดง	ยุ่ยสลาย
8	25	30	45	1.6±0.10	2.0±0.15	ส้มแดง	ยุ่ยสลาย
9	40	30	30	2.0±0.08	2.4±0.06	ส้ม	ยุ่ยสลาย
10	55	30	15	2.8±0.10	2.6±0.06	ส้มนวล	ปกติ
11	10	15	75	1.2±0.05	-	ส้มแดง	แตกหัก
12	25	15	60	1.6±0.12	-	ส้มแดง	แตกหัก
13	40	15	45	2.8±0.15	6.2±0.10	ส้มแดง	ยุ่ยสลาย
14	55	15	30	1.8±0.07	1.8±0.05	ส้ม	ยุ่ยสลาย
15	70	15	15	1.8±0.10	2.0±0.12	ส้มนวล	ปกติ

หมายเหตุ: ทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C



ภาพที่ 4.2 ลักษณะเนื้อดินที่ผ่านกระบวนการผลิตทั้ง 15 สูตร



ภาพที่ 4.3 ลักษณะเนื้อดินของสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์เบื้องต้นจำนวน 7 สูตร

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลเบื้องต้นของวัสดุที่พัฒนาขึ้น

สูตร	พารามิเตอร์				
	pH	ความหนาแน่น (g/cc)	การดูดซึม (%)	การยุ่ยตัว (%)	ความแข็ง* (kg/cm ²)
1	8.44±0.11	1.75±0.35	82±2.87	0.03±0.03	7,031±30.30
2	9.07±0.21	1.47±0.35	112±2.39	0.30±0.13	4,007±3.39
3	7.71±0.13	1.50±0.71	73±1.23	0.05±0.06	11,296±21.10
5	8.76±0.05	1.47±0.85	100±3.95	0.25±0.07	4,451±4.46
6	7.07±0.19	1.62±0.35	63±2.56	0.05±0.06	13,275±65.98
10	6.64±0.11	1.74±0.71	56±1.46	0.05±0.11	10,770±10.37
15	6.95±0.05	1.88±1.41	50±3.19	0.11±0.05	9,389±9.66
Perlite	6.70±0.05	0.07±0.14	231±1.71	0.35±0.07	-

หมายเหตุ: *Modulus of rupture วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการประเมินเบื้องต้นพบว่า สูตรที่ 3 และ สูตรที่ 6 เป็นสูตรที่เหมาะสมสำหรับสำหรับการผลิตเม็ดลูกดินและพัฒนาใช้เป็นวัสดุปลูก เนื่องจากวัสดุที่พัฒนาขึ้นทั้งสองสูตรมีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด (ตารางที่ 3.2) คือ มีค่า pH เป็นกลาง (7.1±0.19-7.7±0.13) ค่าความหนาแน่นต่ำ (1.5±0.71-1.6±0.35 g/cc) มีน้ำหนักเบา อัดน้ำหรือดูดซึมน้ำได้ดี (63±2.56-73±1.23%) ไม่ยุ่ยตัวในน้ำ (0.05±0.06%) และมีความแข็งหรือความคงตัวสูง (11,296±21.10 kg/cm²-13,275±65.98 kg/cm²) เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุผสมที่พัฒนาขึ้น (สูตรที่ 3 และสูตรที่ 6) กับ Perlite (วัสดุปลูกที่จำหน่ายในท้องตลาด) พบว่า Perlite มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ (0.07±0.14 g/cc) จึงมีน้ำหนักเบาและอัดน้ำได้ดีกว่าวัสดุผสมที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของ Perlite ค่อนข้างสูง (231±0.71%) อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Perlite สามารถสลายตัวและยุ่ยตัวในน้ำได้ง่ายจึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (ตารางที่ 4.2)

นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนผสมหรือสูตรผสมของวัตถุดิบ (ดินขาว ดินเบา ไดอะทอมไมท์ และซีลี้อย) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า pH ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และความแข็งของวัสดุแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยพบว่าค่าความแข็งของวัสดุจะลดต่ำลง (ร้อยละ 43-66) เมื่อปริมาณของซีลี้อยที่ผสมมีค่าสูงกว่าร้อยละ 15

4.1.3 การผลิตและคุณสมบัติวัสดุเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6

จากการคัดเลือกสูตรผสมที่เหมาะสมอย่างน้อยจำนวน 2 สูตร จึงได้ทำการผลิตวัสดุเม็ดลูกดินขึ้นจากสูตรที่ 3 (ดินขาว:ดินเบา:ไดอะทอมไมท์:ซีลี้อย=25:60:15) และสูตรที่ 6 (ดินขาว:ดินเบา:ไดอะทอมไมท์:ซีลี้อย=40:45:15) ชนิดแบบท่อนลูกบาศก์ทั้งสองขนาด คือ 0.5x0.5x0.5 cm และ 1x1x1 cm (gxxyxsl) สำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางเคมี รวมทั้งการชะโลหะหนักของเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตรที่ 6 สรุปผลได้ดังนี้

1) องค์ประกอบเชิงปริมาณของวัสดุเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6)

ในส่วนองค์ประกอบทางเคมีนั้น พบว่า ปริมาณองค์ประกอบหลักของเม็ดลูกดินทั้งสองสูตร ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และ สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) โดยมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 72.379-73.716, 12.708-13.529, และ 7.223-9.561 ตามลำดับ ซึ่งผลวิเคราะห์องค์ประกอบในรูปออกไซด์ของเม็ดลูกดิน แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของเม็ดลูกดินโดยวิธี XRF (X-Ray-Fluorescence)

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)	
	สูตร 3	สูตร 6
Na_2O	0.347	0.423
MgO	0.643	0.503
Al_2O_3	12.708	13.529
SiO_2	72.379	73.716
P_2O_5	0.317	0.243
SO_3	0.099	0.087
K_2O	2.729	3.137
CaO	0.542	0.486
TiO_2	0.559	0.532
MnO_2	0.044	0.097
Fe_2O_3	9.561	7.223
CuO	0.011	0.013
ZnO	0.047	0.011

หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) สมบัติทางเคมีและการชะโลหะหนักของวัสดุเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6)

เนื่องจากวัสดุปลูกต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เพราะทำหน้าที่เป็นที่ยึดของรากพืช สารละลายธาตุอาหาร และอากาศ ดังนั้นวัสดุปลูกไม่ควรมีส่วนที่เป็นพิษต่อพืชหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชเจือปน รวมทั้งวัสดุปลูกไม่ควรทำปฏิกิริยากับสารละลายธาตุอาหารเพื่อไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบสารละลายธาตุอาหารที่พืชต้องการ ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและการชะโลหะหนักของเม็ดลูกดินทั้งสองสูตรบ่งชี้ว่า เม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น (สูตร 3 และ สูตร 6) สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกได้อย่างปลอดภัย และไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารในวัสดุปลูก เนื่องจากไม่พบการชะของโลหะหนัก (heavy metals) ได้แก่ Pb, Cd, Cr, และ Hg หรือธาตุปริมาณน้อย (trace elements) ได้แก่ Zn และ Cu ที่ระดับความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังพบว่าเม็ดลูกดินทั้งสองสูตรมีค่าความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ต่ำ-ปานกลาง คือ มีค่าอยู่ในช่วง 13-18 cmol(e)/kg (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางเคมีและการชะโลหะหนักของเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6

พารามิเตอร์	วัสดุเม็ดลูกดิน	
	สูตร 3	สูตร 6
TN (%)	0.07±0.01	0.07±0.02
C.E.C. (cmol/kg)	17.27±0.17	13.17±0.09
Zn (mg/l)	0.014±0.0001	0.028±0.0003
Pb (mg/l)	Nd	Nd
Cu (mg/l)	Nd	Nd
Cd (mg/l)	Nd	Nd
Cr (mg/l)	Nd	Nd
Hg (mg/l)	Nd	Nd

หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาเชียงใหม่
Nd=Not detected

3) สมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6)

ความพรุนตัวเป็นคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุปลูก วัสดุปลูกที่ดีควรมีความพรุนตัวเพื่อรักษาสมดุลอัตราส่วนของน้ำและอากาศให้เหมาะสม โดยทั่วไปอัตราส่วนประมาณร้อยละ 50: 50 และควรเป็นวัสดุที่ไม่มีการอัดตัวหรือยุบตัวเมื่อเปียกน้ำหรือภายหลังการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ควรเป็นวัสดุที่มีความคงทนไม่สลายตัวได้ง่ายทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ผลการวิเคราะห์พบว่า เม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6 ทั้งสองขนาด (ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm และ 1x1x1 cm) มีค่าความพรุนตัวปรากฏเท่ากับร้อยละ 62±0.76-63±1.04 และร้อยละ 60±0.31-0.33 ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเม็ดลูกดินสูตร 3 มีค่าเท่ากับ 1.70±0.59, 13.8±0.71 m²/g, 6.6x10⁻²±0.45 cm³/g และ 1.92x10²±13.45 angstrom ตามลำดับ และสูตร 6 มีค่าเท่ากับ 2.03±0.22, 9.5±0.10 m²/g 5.0x10⁻²±0.21 cm³/g และ 2.13x10²±5.86 angstrom ตามลำดับ โดยสมบัติการรับแรงอัดของเม็ดลูกดินทั้งสองสูตร (ขนาด 1x1x1 cm) พบว่ามีค่าประมาณ 51.45±0.02-53.77±0.06 kg/cm² (ตารางที่ 4.5)

4) ลักษณะพื้นฐานของวัสดุเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานของเม็ดลูกดิน (ภาพที่ 4.4 และ 4.5) โดย Scanning Electron Microscopy (SEM) บ่งชี้ว่าอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบมีผลต่อองค์ประกอบและลักษณะพื้นฐานของเนื้อวัสดุเม็ดลูกดิน เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานระหว่างสูตร 3 (ดินขาว: ดินเบาไดอะทอมไมท์: ชีลี้อย=25:60:15) และสูตร 6 (ดินขาว: ดินเบาไดอะทอมไมท์: ชีลี้อย=40:45:15) พบว่า เม็ดลูกดินที่ผลิตขึ้นจากสูตรที่ 3 มีความพรุนตัวมากกว่าเม็ดลูกดินสูตรที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่มีค่าสูงกว่า (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพและทางกลของเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6

พารามิเตอร์	วัสดุเม็ดลูกดิน	
	สูตร 3	สูตร 6
ความถ่วงจำเพาะ*	1.70±0.59	2.03±0.22
ความพรุนตัวปรากฏ** (%)	62±0.76 (0.5x0.5x0.5 cm) 63±1.04 (1.0x1.0x1.0 cm)	60±0.33 (0.5x0.5x0.5 cm) 60±0.31 (1.0x1.0x1.0 cm)
พื้นที่ผิวจำเพาะ** (m ² /g)	13.8±0.71	9.5±0.10
ปริมาตรรูพรุน** (cm ³ /g)	6.6x10 ⁻² ±0.45	5.0x10 ⁻² ±0.21
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย** (angstrom)	1.92x10 ² ±13.45	2.13x10 ² ±5.86
สมบัติรับแรงอัด** (kg/cm ²)	53.77±0.06	51.45±0.02

หมายเหตุ: *วิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

**วิเคราะห์โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

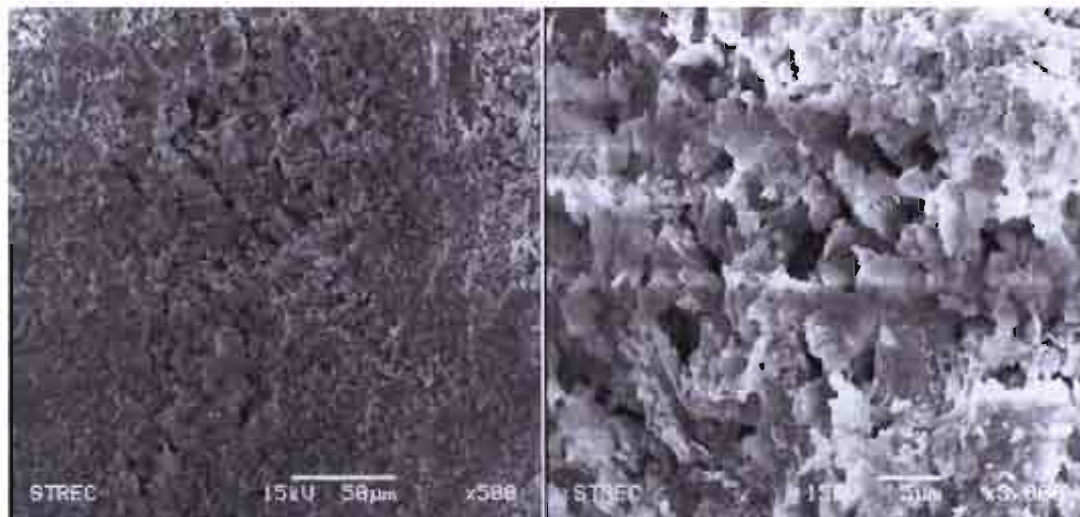
***วิเคราะห์โดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้วยโครงการวิจัยมีวัตถุประสงค์พัฒนาเม็ดลูกดินขึ้นจากวัตถุดิบและวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่น ได้แก่ ดินขาว ไตอะทอไมท์ และซีลี้อยู่สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกพืชและการทำหน้าที่เป็นเม็ดปุ๋ยละลายช้า จากผลการศึกษาสูตรการผลิตที่เหมาะสมและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางกลของเม็ดลูกดิน สามารถสรุปข้อค้นพบจากการวิจัย ดังนี้

1) เม็ดลูกดินที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบทั้งสามชนิด (ดินขาว ไตอะทอไมท์ และซีลี้อยู่) สามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกได้ และในการผลิตไม่จำเป็นต้องเติมสารผสม (binder) เพื่อขึ้นรูปภายใต้สภาวะการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C (อุณหภูมิการเผาช่วงต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนตัวสูงและดูดซึมน้ำได้ดี) โดยมีค่าใช้จ่ายจากการประมาณการเบื้องต้น (วัตถุดิบ การเสื่อมราคา ค่าไฟ และค่าแรง) ในการผลิตเม็ดลูกดินชนิดท่อนลูกบาศก์อยู่ที่ประมาณ 0.4-0.5 บาท/กิโลกรัม

2) สูตรผสมของวัตถุดิบส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีรวมทั้งคุณสมบัติต่างๆ ของเม็ดลูกดิน จากการศึกษาสูตรผสมวัสดุปลูกที่ทดสอบทั้งหมดจำนวน 15 สูตร (สูตรสามเหลี่ยม) พบว่าสูตรที่ผ่านการคัดเลือกจำนวน 2 สูตร ได้แก่ สูตรผสม ดินขาว: ไตอะทอไมท์: ซีลี้อยู่ คือ 25:60:15 (สูตร 3) และ 40:45:15 (สูตร 6) ทั้งนี้สูตรผสมที่มีปริมาณซีลี้อยู่สูงกว่าร้อยละ 30 ส่งผลให้เนื้อดินมีลักษณะแตกหักและยุ่ยสลายภายหลังการเผาเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ปริมาณซีลี้อยู่ที่สูงกว่าร้อยละ 15 พบว่าค่าความแข็งของเม็ดลูกดินลดลงจากเดิมถึงร้อยละ 43-66

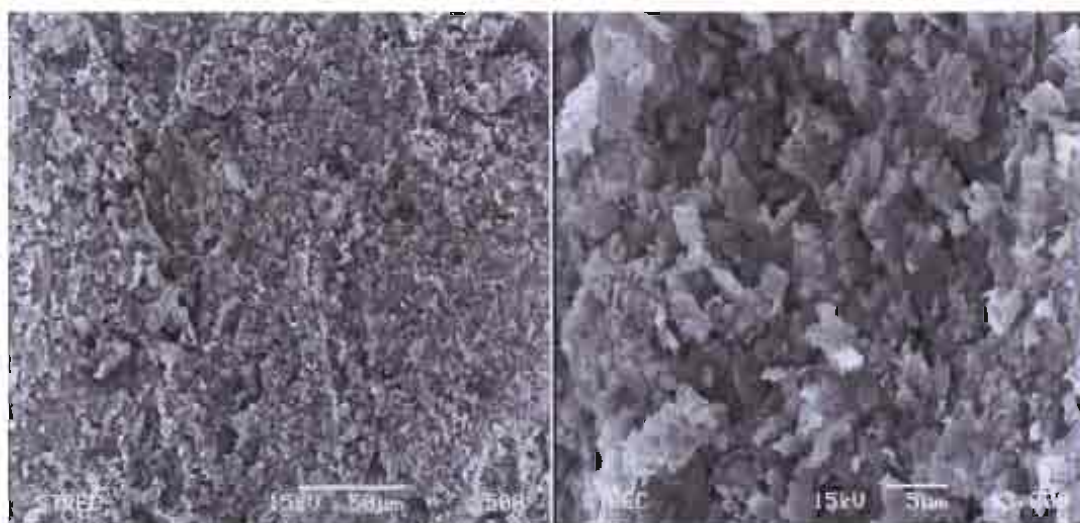
3) เม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6 มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกดังนี้ มีค่า pH เป็นกลาง ค่าความจุการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ต่ำ-ปานกลาง ค่าความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา อุดมน้ำหรือดูดซึมน้ำได้ดี ไม่ยุ่ยตัวในน้ำ และมีความแข็งหรือความคงตัวสูงจึงเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย



(A)

(B)

ภาพที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานของเม็ดลูกดินสูตร 3 (A=ขยาย 500 เท่า; B=ขยาย 3,000 เท่า)



(A)

(B)

ภาพที่ 4.5 ลักษณะสัณฐานของเม็ดลูกดินสูตร 6 (A=ขยาย 500 เท่า; B=ขยาย 3,000 เท่า)

4) เม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6 มีองค์ประกอบเชิงปริมาณทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณองค์ประกอบหลักที่พบ ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และ สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 72.379-73.716, 12.708-13.529, และ 7.223-9.561 และผลทดสอบการชะโลหะหนักบ่งชี้ว่าเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น (สูตร 3 และ สูตร 6) สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกได้อย่างปลอดภัยและไม่ส่งผลเป็นพิษต่อพืช

5) เม็ดลูกดินสูตร 3 มีความพรุนตัวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าสูตร 6 จึงส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.70) มีค่าต่ำกว่าเม็ดลูกดินสูตร 6 (2.03) และพื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดลูกดินสูตร 3 มีค่าสูงกว่าสูตร 6 ประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการวิเคราะห์สัณฐานของเม็ดลูกดิน โดย Scanning Electron Microscopy

4.2 การเตรียมวัสดุเม็ดลูกดินด้วยสารละลายยูเรีย

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบเงื่อนไขการเตรียมเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6) ทั้งสองขนาด (ท่อนลูกบาศก์ ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm และ 1x1x1 cm) คือ 1) การทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 2) การทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การศึกษาพบว่าในการเตรียมเม็ดลูกดินด้วยสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยละลายยูเรีย 1 กิโลกรัมในน้ำ 10 ลิตร (TN=4.6%) สามารถเตรียมเม็ดลูกดินได้ประมาณ 30 กิโลกรัม ผลการทดสอบเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียทั้งสองสภาวะ (ตารางที่ 4.6) พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 22-24 (แห้งที่อุณหภูมิห้อง) และร้อยละ 5-12 (แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$) สำหรับค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนทั้งหมด (TN) และไนเตรท-ไนโตรเจน (NO_3^--N) พบว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.7-2.5 (มวลแห้ง) และ 1.9-3.0 mg/kg (มวลแห้ง) ตามลำดับ นอกจากนี้ ที่เงื่อนไขการทำให้แห้งแตกต่างกัน พบว่าวิธีการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีผลให้ค่าความชื้นของเม็ดลูกดินทั้งสองสูตร (สูตร 3 และ 6) ต่ำกว่าการปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ถึงร้อยละ 10-18

ตารางที่ 4.6 ปริมาณ TN และ NO_3^--N ของเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียเข้มข้น 10%

เงื่อนไข	ไนโตรเจนทั้งหมด* (TN, %)			
	สูตร 3		สูตร 6	
	50mm	100mm	50mm	100mm
เม็ดลูกดินก่อนเตรียม (Unmodified)	0.07 $\pm$ 0.006	0.06 $\pm$ 0.012	0.07 $\pm$ 0.010	0.07 $\pm$ 0.006
หลังแช่ด้วยยูเรีย 24 ชั่วโมง	2.79 $\pm$ 0.112	2.57 $\pm$ 0.127	2.57 $\pm$ 0.089	2.64 $\pm$ 0.040
แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	1.98 $\pm$ 0.040	1.91 $\pm$ 0.069	2.00 $\pm$ 0.006	1.78 $\pm$ 0.115
แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ 24 ชั่วโมง	2.36 $\pm$ 0.127	2.45 $\pm$ 0.010	2.40 $\pm$ 0.015	2.17 $\pm$ 0.038
เงื่อนไข	ไนเตรท-ไนโตรเจน* (NO_3^--N , mg/kg)			
	สูตร 3		สูตร 6	
	50mm	100mm	50mm	100mm
แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	1.94 $\pm$ 0.010	2.26 $\pm$ 0.060	1.94 $\pm$ 0.006	2.26 $\pm$ 0.112
แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ 24 ชั่วโมง	2.91 $\pm$ 0.117	2.26 $\pm$ 0.170	1.94 $\pm$ 0.040	1.94 $\pm$ 0.061
เงื่อนไข	ความชื้น (%)			
	สูตร 3		สูตร 6	
	50mm	100mm	50mm	100mm
แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	23.76 $\pm$ 0.20	22.48 $\pm$ 0.16	23.31 $\pm$ 0.64	23.30 $\pm$ 0.22
แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ 24 ชั่วโมง	11.59 $\pm$ 0.41	10.20 $\pm$ 0.20	5.93 $\pm$ 0.40	9.11 $\pm$ 0.61

หมายเหตุ: *มวลแห้ง

วิเคราะห์โดยคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย)

จำกัด สาขาเชียงใหม่

เม็ดลูกดินทั้งสองสูตรและทั้งสองขนาดที่ไม่ผ่านการเตรียมมีค่า TN เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 0.06-0.07 (มวลแห้ง) ภายหลังการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียโดยการแช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเม็ดลูกดินสามารถดูดซึมปุ๋ยยูเรียและมีค่า TN เพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 36-43 เท่า คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 2.57-2.79 เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกันต่อปริมาณ TN และ NO_3^- -N ในวัสดุเม็ดลูกดิน พบว่าการผึ่งแห้งตามปกติหรือการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ($\text{TN}=1.78\text{-}2.00\%$) ส่งผลให้ค่า TN มีค่าต่ำกว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^\circ\text{C}$ ($\text{TN}=2.17\text{-}2.45\%$) อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ถึงร้อยละ 16-22 ในทุกเงื่อนไขที่ทดสอบ บ่งชี้ว่าปุ๋ยยูเรียสามารถเปลี่ยนรูปและสูญเสียสู่ชั้นบรรยากาศได้โดยง่าย เฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น วิธีการทำให้แห้งในภาชนะควบคุมอุณหภูมิสามารถลดการสูญเสียปริมาณ TN ในเม็ดลูกดินลงได้ อย่างไรก็ตามผลการศึกษพบว่าวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ต่อความแตกต่างของค่า NO_3^- -N ในเม็ดลูกดิน ขณะเดียวกันสูตรผสมของเม็ดลูกดินที่แตกต่างกัน (สูตร 3 และ สูตร 6) พบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ต่อความแตกต่างของค่า TN และ NO_3^- -N ในเม็ดลูกดินตามลำดับ (ตารางที่ 4.6)

4.3 การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการชะล้าง

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ภายใต้การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินที่สภาวะการชะล้างด้วยน้ำกลั่น (distilled water) และสารละลายดินสังเคราะห์ (synthesis soil solution) จำนวน 14 ชุดการทดลอง (แผนการทดลองระยะที่ 3) โดยศึกษาเปรียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเตรียมเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6) ทั้งสองขนาด (ท่อนลูกบาศก์ ขนาด $0.5\times 0.5\times 0.5$ cm และ $1\times 1\times 1$ cm) คือ 1) การทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 2) การทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.3.1-4.3.3 ตามลำดับ

4.3.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการทดลองพบว่า ค่า pH เริ่มต้นของน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 7.05 และ 6.62 ตลอดช่วงการทดสอบพบว่าค่า pH ในน้ำชะของ Osmocote และปุ๋ยยูเรีย ภายใต้เงื่อนไขการชะด้วยน้ำกลั่นมีค่าอยู่ในช่วง 4.88-6.01 และ 5.63-8.96 ส่วนเงื่อนไขการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์มีค่า pH อยู่ในช่วง 4.66-5.91 และ 5.00-8.40 ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่า pH ในน้ำชะของชุดการทดลองควบคุม (Control) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (pH 6-7) ตลอดการทดลอง (720 ชั่วโมง) และมีค่าใกล้เคียงกับค่า pH เริ่มต้นของน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์ที่ใช้ทดสอบ สำหรับผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สูตรผสม (สูตร 3/สูตร 6) ขนาดเม็ดลูกดิน ($0.5\times 0.5\times 0.5$ cm/ $1.0\times 1.0\times 1.0$ cm) อุณหภูมิในการทำให้แห้ง (อุณหภูมิห้อง/ $75\pm 5^\circ\text{C}$) และชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง (น้ำกลั่น/สารละลายดินสังเคราะห์) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย (ความเข้มข้น 10%) มีดังนี้

1) เม็ดลูกดินสูตร 3 ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.25-7.43 ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่า pH ในน้ำชะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่า pH ตลอดช่วงการทดสอบ พบว่ามีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 4.53-6.62 (แผนภูมิที่ 4.1-ก)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกลางประมาณ 6.07-6.85 หลังจากนั้นค่า pH ในน้ำชะได้ลดลงและมีค่าค่อนข้างเป็นกรดอยู่ในช่วง 4-6 (pH 4.27-5.70) จนสิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมง) ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่า pH ในน้ำชะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และภายหลังจากชั่วโมงที่ 6 เป็นต้นไป ค่า pH ในน้ำชะตลอดช่วงการทดลอง พบว่ามีค่าค่อนข้างเป็นกรดประมาณ 4.72-5.86 (แผนภูมิที่ 4.1-ข)

2) เม็ดลูกดินสูตร 3 ขนาด 1.0x1.0x1.0 cm

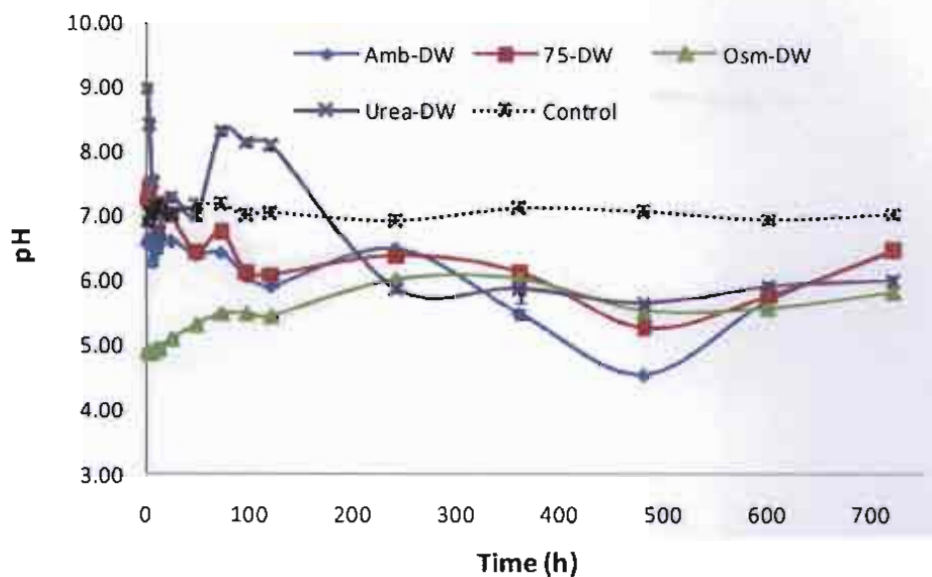
ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 360 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกลางประมาณ 6.14-7.70 หลังจากนั้นค่า pH ในน้ำชะได้ลดลงและมีค่าเป็นกรดเล็กน้อยอยู่ในช่วง 5.42-5.93 จนสิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมง) ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะคล้ายกันและมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ตลอดช่วงการทดสอบพบว่าค่า pH ในน้ำชะมีค่าประมาณ 5.35-7.04 (แผนภูมิที่ 4.2-ก)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.08-6.67 ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่า pH ในน้ำชะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.07-6.80 (แผนภูมิที่ 4.2-ข)

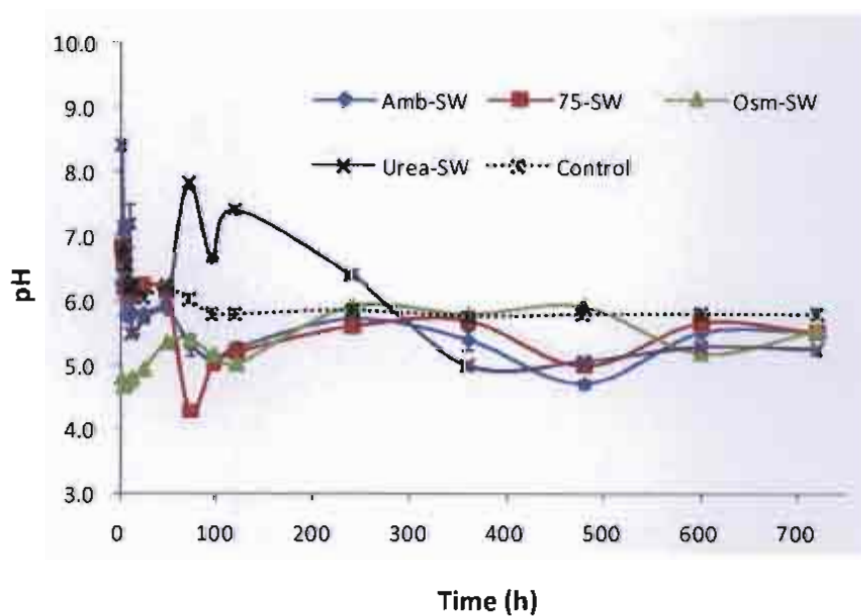
3) เม็ดลูกดินสูตร 6 ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกลางประมาณ 5.89-7.47 ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่า pH ในน้ำชะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเป็นกลางประมาณ 5.72-8.07 (แผนภูมิที่ 4.3-ก)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.23-7.11 ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่า pH ในน้ำชะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.10-7.56 (แผนภูมิที่ 4.3-ข)

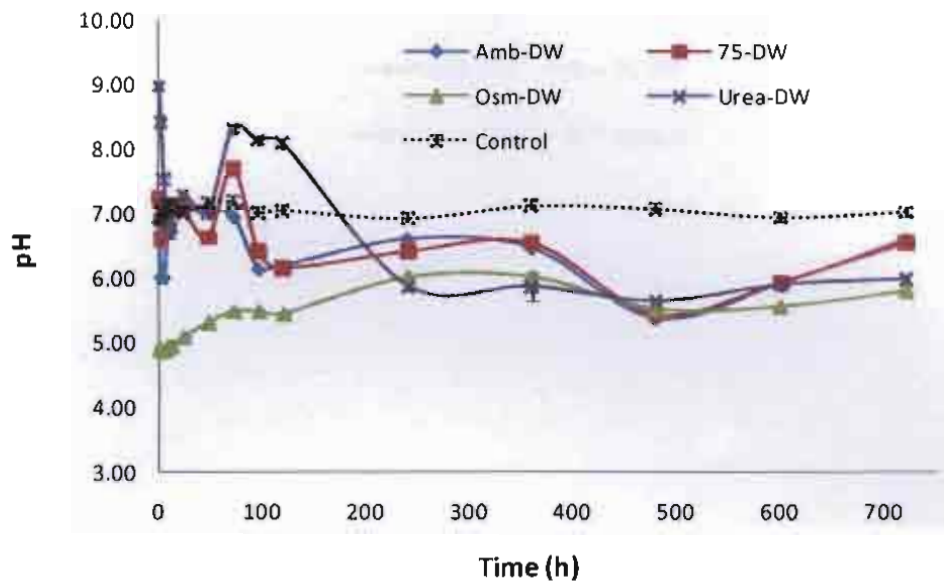


(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)

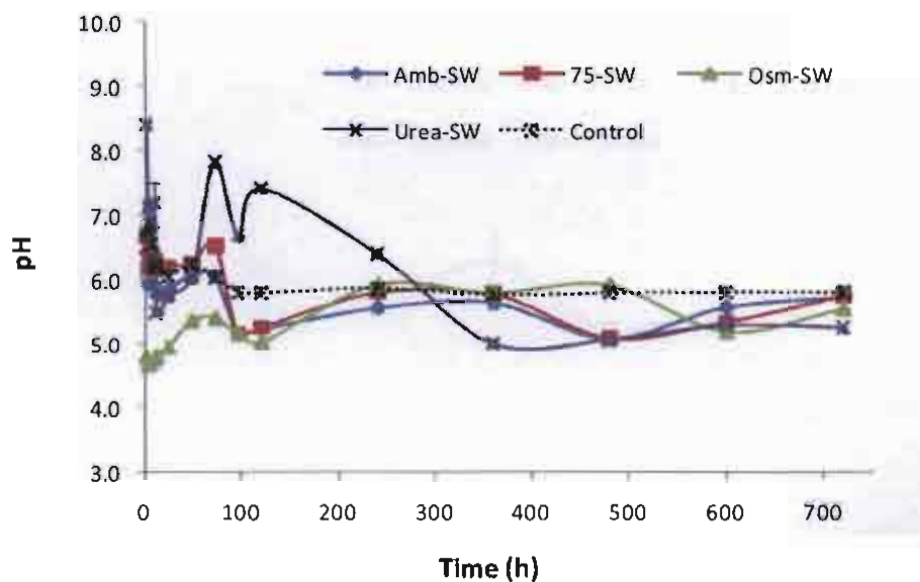


(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห่งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห่งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)

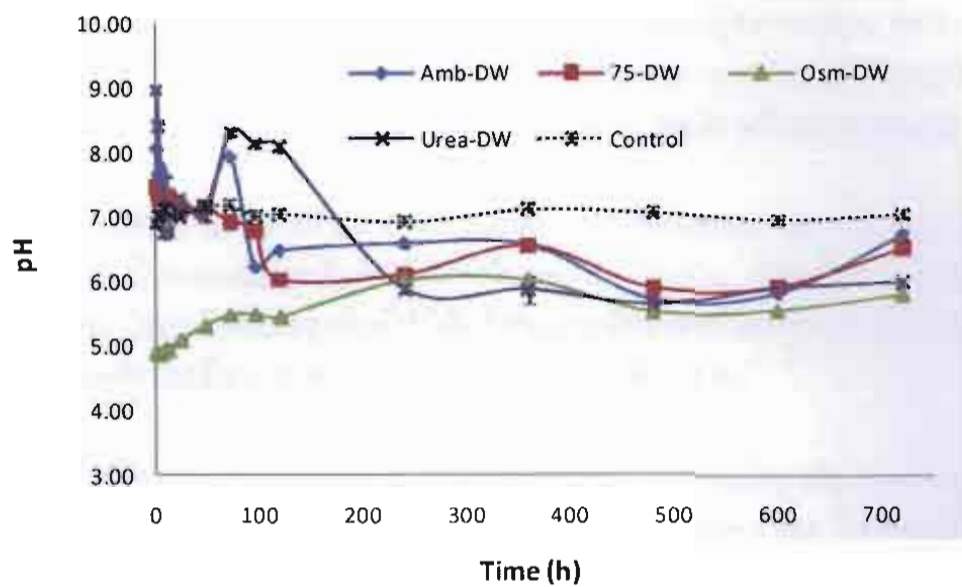


(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)

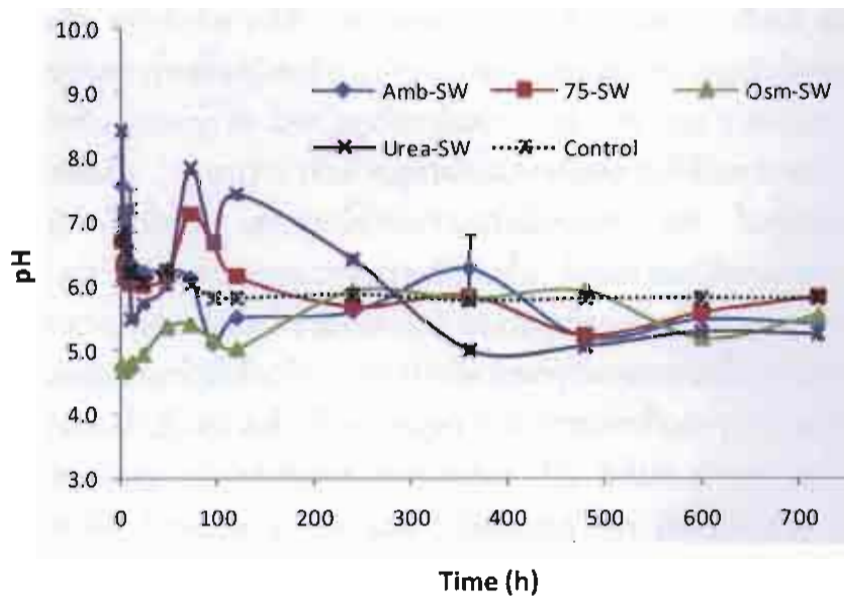


(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)



(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)



(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)

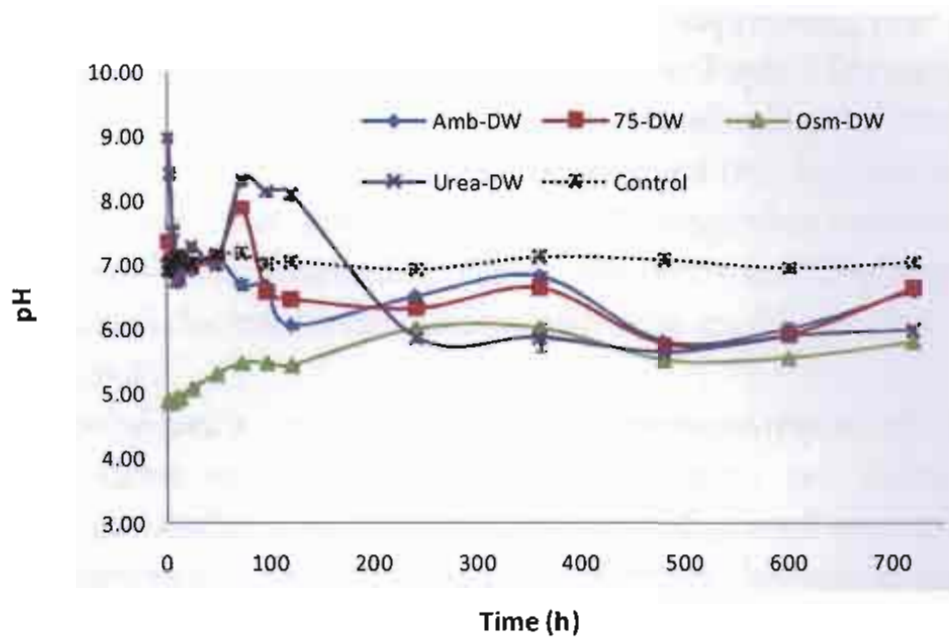
4) เม็ดลูกดินสูตร 6 ขนาด 1.0x1.0x1.0 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกลางประมาณ 5.76-7.88 ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่ามีค่า pH ในน้ำชะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเป็นกลางประมาณ 5.82-7.13 (แผนภูมิที่ 4.4-ก)

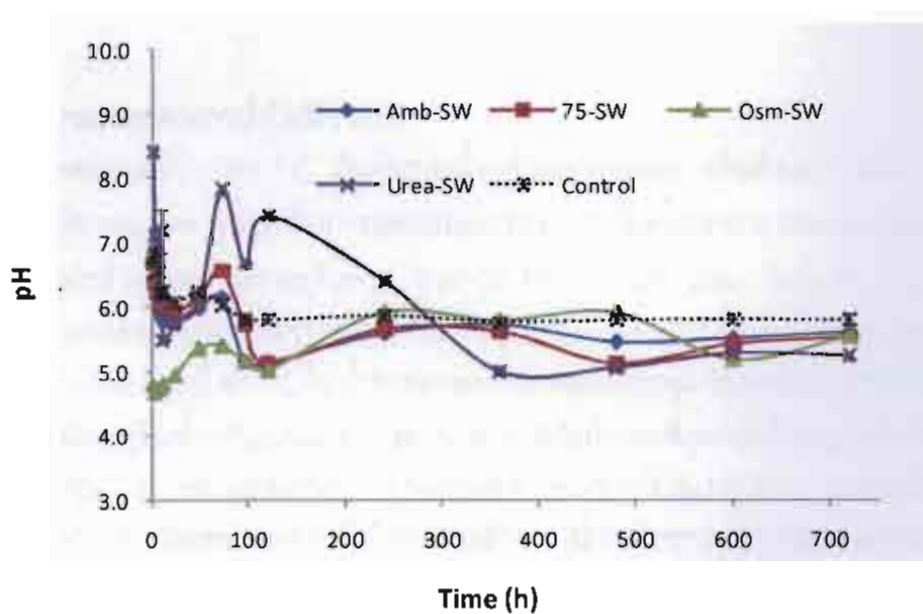
ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่า ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.13-6.68 ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่ามีค่า pH ในน้ำชะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลางประมาณ 5.15-6.90 (แผนภูมิที่ 4.4-ข)

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะที่เกิดขึ้น ระหว่างเม็ดลูกดิน Osmocote และปุ๋ยยูเรีย พบว่ากรณีของเม็ดลูกดินและปุ๋ยยูเรียมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะที่ใกล้เคียงกัน คือ ค่า pH จะมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นหรือมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่นานขึ้น แต่ใน 3 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ ค่า pH ในน้ำชะของปุ๋ยยูเรียจะมีค่าค่อนข้างเป็นด่าง (pH 8-9) หลังจากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองของเม็ดลูกดิน ในทางตรงกันข้ามค่า pH ในน้ำชะของ Osmocote ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ พบว่ามีค่าค่อนข้างเป็นกรด (pH 4-5) หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้น อย่างไรก็ตามที่สิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมงหรือ 1 เดือน) พบว่าค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินในทุกชุดการทดลองยังคงมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ 5.42-6.73 [37,38,39] สำหรับ Osmocote และปุ๋ยยูเรียอยู่ในช่วง 5.53-5.79 และ 5.25-5.98 ตามลำดับ

จากผลการทดลอง พบว่าปัจจัยด้านสูตรผสมและชนิดสารที่ใช้ในการชะล้างมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะ นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของค่า pH ในทุกชุดการทดลองยกเว้น Osmocote มีค่า pH ลดลงตามระยะเวลาการชะที่นานขึ้น ถึงแม้ว่าสมบัติทางกายภาพ ลักษณะและปริมาณองค์ประกอบทางแร่และทางเคมี รวมทั้งค่า pH ของวัสดุเม็ดลูกดินทั้งสองสูตร (สูตร 3 และ สูตร 6) ที่พัฒนาขึ้นจะมีค่าและลักษณะใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามผลการทดสอบบ่งชี้ว่าภายใต้สภาวะการชะล้าง (ทั้งน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์) เม็ดลูกดินสูตร 6 สามารถสะท้อนค่า pH ในน้ำชะให้มีค่าค่อนข้างเป็นกลางได้ดีกว่าเม็ดลูกดินสูตร 3 โดยตลอดช่วงการทดลอง (720 ชั่วโมง) ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินสูตร 6 ทั้งสองขนาด คือ 1.0x1.0x1.0 cm และ 0.5x0.5x0.5 cm มีค่าไม่ต่ำกว่า 5 ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากระดับความสามารถในแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) และพื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดลูกดิน โดยปกติค่าความสามารถในแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC) ของดิน เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการตรึงหรืออนุรักษ์ธาตุอาหารไว้ในดินโดยการแลกเปลี่ยนประจุ (บวกและลบ) ที่ผิวสัมผัสของอนุภาคดิน ดังนั้นดินที่มีค่า CEC สูง เช่น ดินเหนียว หรือดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงก็จะสามารถตรึงธาตุอาหารสำหรับการนำไปใช้โดยรากพืชได้นานขึ้น นอกจากนี้ อัตราการดูดซึมต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุย่อมมีค่าแปรผันตามสมบัติความพรุนตัวและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุที่สูงขึ้น [38,39,40]



(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)



(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$; Osm=Osmocote; Urea=ปุ๋ยยูเรีย;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)

เนื่องจากเม็ดลูกดินสูตร 3 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC, 17.27 cmol(e)/kg) สูงกว่าเม็ดลูกดินสูตร 6 (CEC, 13.17 cmol(e)/kg) ประกอบกับเม็ดลูกดินสูตร 3 มีความพรุนตัวและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า (1.5 เท่า) เม็ดลูกดินสูตร 6 ดังนั้น ในขั้นตอนการเตรียมเม็ดลูกดินด้วยสารละลายยูเรีย จึงอาจส่งผลต่อการดูดซับ การแลกเปลี่ยนประจุ และการตรึงธาตุอาหาร NH_4^+ ในสารละลายยูเรียได้ดีกว่าเม็ดลูกดินสูตร 6 เมื่อทำการทดสอบภายใต้สภาวะการชะล้าง จึงปรากฏการชะสารละลายธาตุอาหารและส่งผลต่อการลดลงของค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินสูตร 3 ที่มีค่าต่ำกว่า ขณะที่เม็ดลูกดินสูตร 6 ซึ่งมีค่า CEC ต่ำกว่าจึงมีแนวโน้มเกิดการชะสารประกอบพวกประจุลบในน้ำชะ และเกิดการสะท้อนค่า pH ในลำดับต่อมา [26,27,38,39,40]

สำหรับปัจจัยด้านขนาด และอุณหภูมิในการทำแห้งซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความชื้นของเม็ดลูกดิน ถือเป็นปัจจัยทางกายภาพ พบว่าไม่มีผลต่อแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารที่ใช้ในการชะล้างต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะ พบว่าการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์จะส่งผลให้ค่า pH ในน้ำชะของทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าการชะด้วยน้ำกลั่น ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากค่า pH เริ่มต้นของสารละลายดินสังเคราะห์ (pH 6.62) ที่ต่ำกว่าน้ำกลั่น (pH 7.05) รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีในสารละลายดินสังเคราะห์ที่มีธาตุประจุบวกเป็นส่วนใหญ่ (Mg^{++} , Ca^{++} , K^+) จึงอาจส่งเสริมการแลกเปลี่ยนประจุและเกิดชะสารละลายธาตุอาหาร (ยูเรีย) ซึ่งส่งผลต่อการลดลงของค่า pH มีค่าที่ต่ำกว่าสภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น [26,27,38,39,40]

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า (EC)

จากการทดลองพบว่า ค่า EC เริ่มต้นของน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 4.98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และ 2.54 mS/cm ตลอดช่วงการทดสอบพบว่าค่า EC ในน้ำชะของ Osmocote และปุ๋ยยูเรีย ภายใต้เงื่อนไขการชะด้วยน้ำกลั่นมีค่าอยู่ในช่วง 0.67-13.34 mS/cm และ 3.05-96.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ส่วนเงื่อนไขการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์มีค่า EC อยู่ในช่วง 0.63-12.53 mS/cm และ 0.31-0.39 mS/cm ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่า EC ในน้ำชะของชุดการทดลองควบคุม (Control) ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 4-6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ สำหรับผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สูตรผสม (สูตร 3/สูตร 6) ขนาดเม็ดลูกดิน (0.5x0.5x0.5 cm/1.0x1.0x1.0 cm) อุณหภูมิในการทำแห้ง (อุณหภูมิห้อง/75±5°C) และชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง (น้ำกลั่น/สารละลายดินสังเคราะห์) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย (ความเข้มข้น 10%) มีดังนี้

1) เม็ดลูกดินสูตร 3 ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C ออกเป็น 3 ช่วง คือ ในช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-72) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 96-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 104.77-397.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 28.87-56.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ และ 5.85-9.58 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ตามลำดับ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะมีลักษณะเช่นเดียวกัน โดยช่วงแรก (ชั่วโมงที่

0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-72) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 96-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 80.30-275.33 $\mu\text{S/cm}$ 23.47-42.17 $\mu\text{S/cm}$ และ 3.81-8.91 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.5)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ ตลอดการทดลอง (720 ชั่วโมง) มีค่าประมาณ 320.00-649.33 $\mu\text{S/cm}$ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 320.00-510.00 $\mu\text{S/cm}$ (แผนภูมิที่ 4.5)

2) เม็ดลูกดินสูตร 3 ขนาด 1.0x1.0x1.0 cm

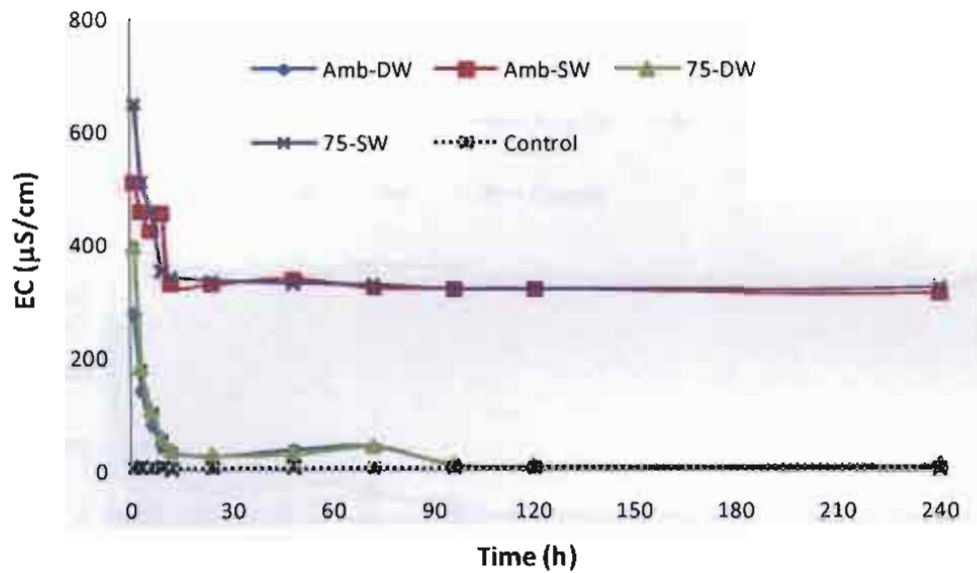
ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ ออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-72) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 96-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 103.80-169.50 $\mu\text{S/cm}$ 32.10-83.27 $\mu\text{S/cm}$ และ 6.95-14.52 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะมีลักษณะเช่นเดียวกัน โดยช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-48) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 72-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 81.10-320.33 $\mu\text{S/cm}$ 12.89-20.10 $\mu\text{S/cm}$ และ 5.00-8.45 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.6)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ ตลอดการทดลอง (720 ชั่วโมง) มีค่าประมาณ 320.00-529.33 $\mu\text{S/cm}$ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 319.00-454.67 $\mu\text{S/cm}$ (แผนภูมิที่ 4.6)

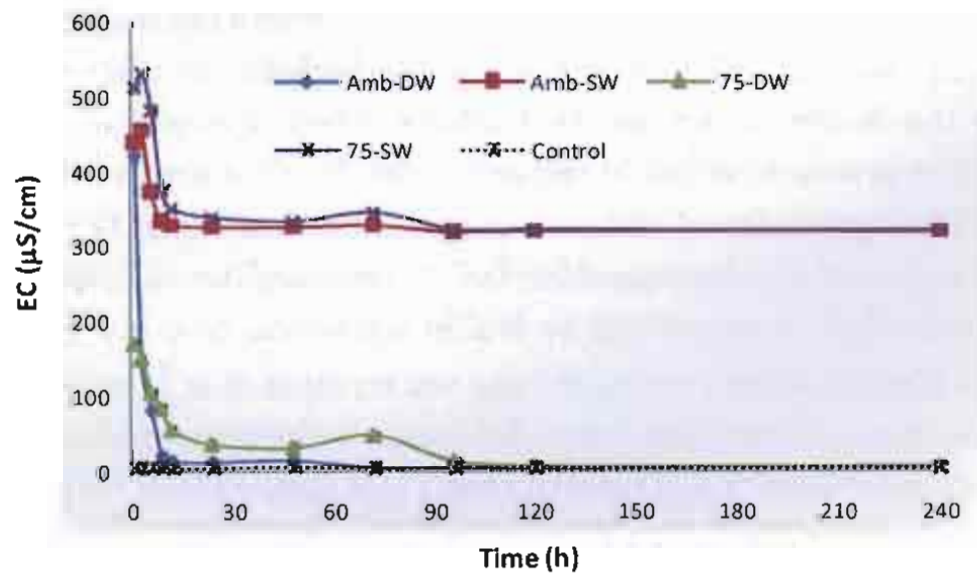
3) เม็ดลูกดินสูตร 6 ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ ออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-96) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 120-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 58.07-186.60 $\mu\text{S/cm}$ 17.94-32.10 $\mu\text{S/cm}$ และ 4.31-5.64 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะมีลักษณะเช่นเดียวกัน โดยช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-12) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 24-72) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 96-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 82.80-260.33 $\mu\text{S/cm}$ 42.50-53.03 $\mu\text{S/cm}$ และ 3.46-12.50 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.7)

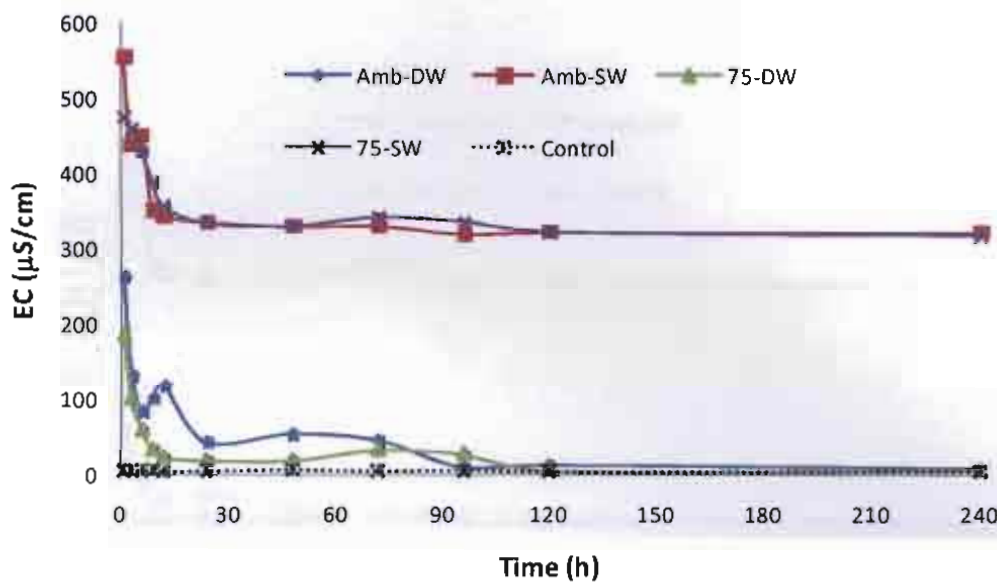
ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ ตลอดการทดลอง (720 ชั่วโมง) มีค่าประมาณ 317.00-474.33 $\mu\text{S/cm}$ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 319.33-554.00 $\mu\text{S/cm}$ (แผนภูมิที่ 4.7)



แผนภูมิที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;
 SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)



แผนภูมิที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;
 SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)



แผนภูมิที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm)

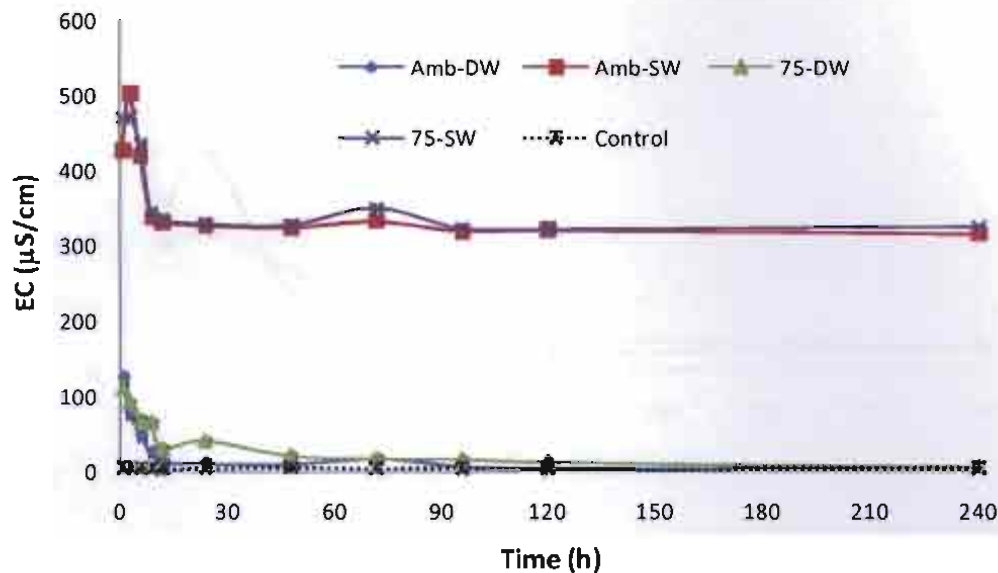
(Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;

SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)

4) เม็ดลูกดินสูตร 6 ขนาด 1.0x1.0x1.0 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-9) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 12-120) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 240-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 65.53-111.43 $\mu\text{S/cm}$ 12.35-41.33 $\mu\text{S/cm}$ และ 4.66-6.09 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะมีลักษณะเช่นเดียวกัน โดยช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-72) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 96-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 47.53-125.83 $\mu\text{S/cm}$ 10.32-25.80 $\mu\text{S/cm}$ และ 3.08-7.65 $\mu\text{S/cm}$ ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.8)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ตลอดการทดสอบ (720 ชั่วโมง) มีค่าประมาณ 321.00-471.67 $\mu\text{S/cm}$ ในกรณีของเม็ดลูกดินที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องพบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 315.67-502.70 $\mu\text{S/cm}$ (แผนภูมิที่ 4.8)



แผนภูมิที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm)

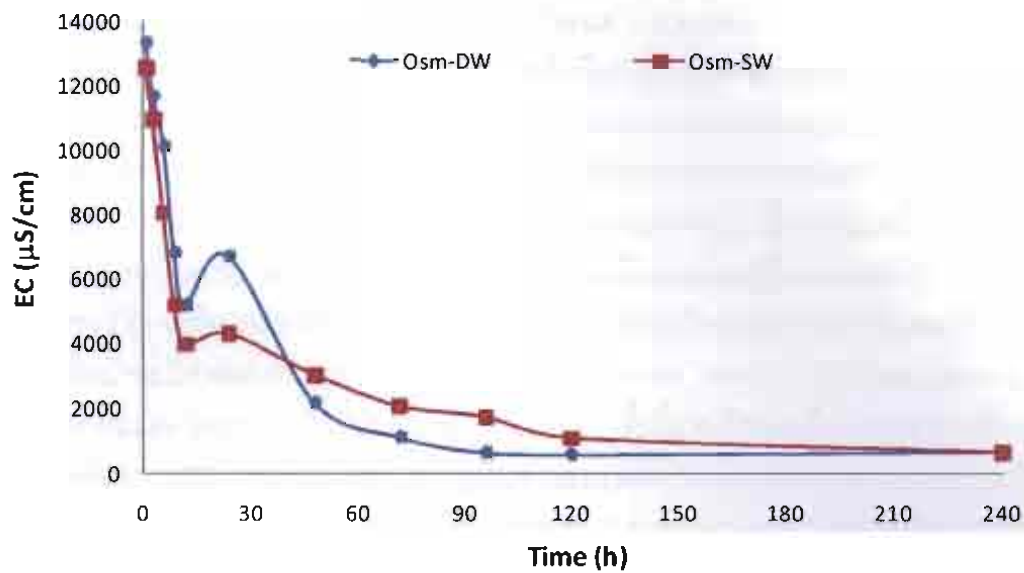
(Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;

SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์; Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมิดด้วยน้ำกลั่น)

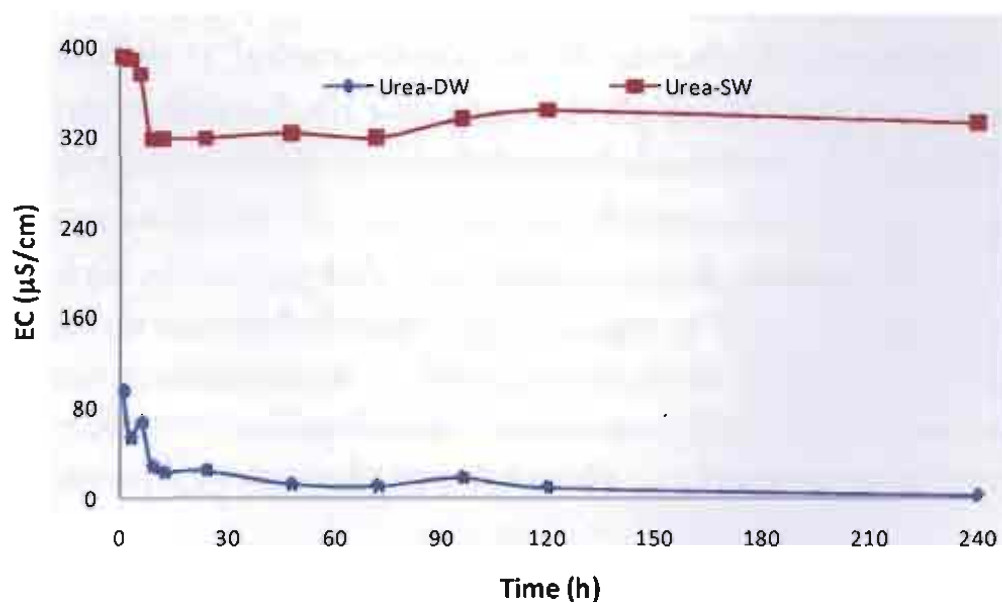
5) Osmocote และปุ๋ย Urea

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของ Osmocote ออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก (ชั่วโมงที่ 0-6) ช่วงกลาง (ชั่วโมงที่ 9-72) และช่วงปลาย (ชั่วโมงที่ 96-720) พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 10.16-13.34 mS/cm 1.10-6.85 mS/cm และ 0.43-0.67 mS/cm ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.9) สำหรับการทดลองการชะของปุ๋ย Urea พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะค่อนข้างผันผวนในช่วง 72 ชั่วโมงของการทดสอบ โดยมีค่า EC แปรปรวนอยู่ในช่วงประมาณ 9.74-96.10 μS/cm (แผนภูมิที่ 4.10) หลังจากนั้น ค่า EC ในน้ำชะจะมีค่าประมาณ 2.79-28.43 μS/cm จนสิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมง)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า EC ในน้ำชะของ Osmocote ตลอดการทดลอง (720 ชั่วโมง) มีค่าประมาณ 0.62-12.53 MS/cm ในกรณีของปุ๋ย Urea พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 317.67-390.33 μS/cm (แผนภูมิที่ 4.9-4.10)



แผนภูมิที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของ Osmocote
(DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)



แผนภูมิที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่า EC ของปุ๋ย Urea
(DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น; SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)

การวัดค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity, EC) ของดินหรือวัสดุปลูกเป็นการวัดค่าการนำไฟฟ้าในสารละลาย เพื่อทราบถึงความเข้มข้นของเกลือทั้งหมด (soluble salts) ที่ละลายน้ำ โดยไม่สามารถแยกชนิดของเกลือในสารละลายได้ ค่าการนำไฟฟ้าที่สูง บ่งชี้ถึงปริมาณเกลือที่ละลายออกมามาก ซึ่งเกลือที่ละลายออกมามากนี้มีผลต่อการใช้น้ำและธาตุอาหาร (mineralization) ของพืชลดลง และอาจเป็นอันตรายต่อพืชได้ [42,43] เรวัตร์ จินดาเจีย (2546) ได้รายงานค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของวัสดุปลูกควรอยู่ในช่วง 1.5–3.0 mS/cm เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะที่เกิดขึ้น ระหว่างเม็ดลูกดิน Osmocote และปุ๋ยยูเรีย พบว่าทุกกรณีที่ทดสอบมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะที่เหมือนกัน คือ ค่า EC จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่นานขึ้น อย่างไรก็ตามเฉพาะเงื่อนไขของ Osmocote พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าค่อนข้างสูงมากในช่วงแรก-กลาง (1-14 mS/cm) และแตกต่างจากชุดการทดลองของเม็ดลูกดินและปุ๋ยยูเรียอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากสารเคลือบเม็ดปุ๋ย (เรซิน) ที่ส่งผลต่อค่า EC ในน้ำชะที่ค่อนข้างสูงในช่วงแรกหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและที่ประมาณ 1 เดือน (720 ชั่วโมง) ค่า EC ในน้ำชะมีค่าประมาณ 0.4-0.7 mS/cm ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาโดย Cabrera (1997) ที่พบว่าค่า EC ในน้ำชะของการใช้ Osmocote (Scotts Co., 18-6-12, 18-6-12F5) ภายหลัง 30 วัน มีค่าประมาณ 0.7-1.2 mS/cm

ถึงแม้ว่าค่า EC ในน้ำชะของปุ๋ยยูเรียทั้งสองสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง 2.79-96.10 $\mu\text{S/cm}$ (น้ำกลั่น) และ 300-400 $\mu\text{S/cm}$ (สารละลายดินสังเคราะห์) ถือว่าเป็นค่าการนำไฟฟ้า (ค่าความเข้มข้นของเกลือทั้งหมดที่ละลายน้ำ) ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบ (non-saline <400 $\mu\text{S/cm}$, 0.4 mS/cm) ต่อพืช ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากสมบัติของปุ๋ยยูเรียซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วไฟฟ้า และไม่แตกตัวขณะเป็นสารละลาย [39,45] เช่นเดียวกันกับค่า EC ในน้ำชะของวัสดุเม็ดลูกดิน (ที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย) ทุกชุดการทดสอบทั้งสองสภาวะ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 3-400 $\mu\text{S/cm}$ (น้ำกลั่น) และ 300-700 $\mu\text{S/cm}$ (สารละลายดินสังเคราะห์) ถือว่าเป็นค่าการนำไฟฟ้า (ค่าความเข้มข้นของเกลือทั้งหมดที่ละลายน้ำ) ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบ (non-saline <400 $\mu\text{S/cm}$, 0.4 mS/cm) ถึงส่งผลต่อพืชน้อยมาก (very slightly saline 400-800 $\mu\text{S/cm}$, 0.4-0.8 mS/cm) [39] ดังนั้น วัสดุเม็ดลูกดินที่ถูกพัฒนาขึ้นจากแร่ดินเบาและโคอะทอไมต์ และผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียทั้งสองสูตร (สูตร 3 และสูตร 6) ซึ่งมีสมบัติเฉื่อยทางเคมีรวมทั้งมีค่าการนำไฟฟ้าและค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ จึงมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุปลูกพืชแทนดินขณะเดียวกัน ภายใต้สภาวะการเพาะเม็ดลูกดินด้วยน้ำกลั่นหรือสารละลายดินสังเคราะห์ได้ส่งผลน้อยมากถึงระดับไม่ส่งผลเลยต่อการใช้อาหารและด้านความเป็นพิษต่อพืช จากผลกระทบของปริมาณเกลือที่ละลายออกมา

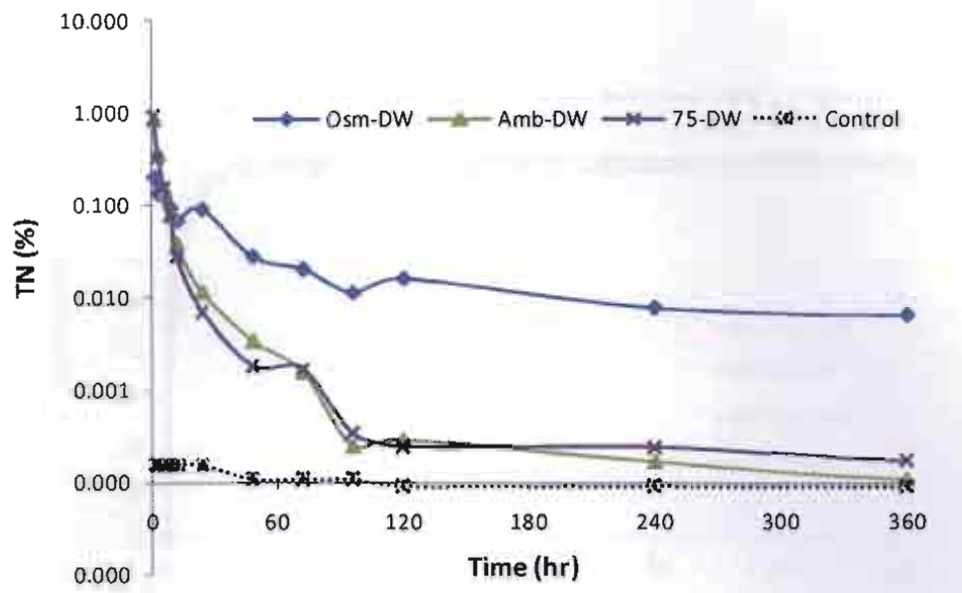
4.3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN)

จากการทดลองพบว่า ค่า TN เริ่มต้นของวัสดุเม็ดลูกดิน (control) เม็ดลูกดินสูตร 3 เม็ดลูกดินสูตร 6 และ Osmocote (13-13-13) มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.07, 1.91-2.45, 1.78-2.40, และ 13 ตามลำดับ ตลอดช่วงการทดสอบ (720 ชั่วโมง) พบว่าค่า TN ในน้ำชะของ Osmocote ภายใต้เงื่อนไขการชะด้วยน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.01-0.2 นอกจากนี้ ในน้ำชะของชุดการทดลองควบคุม (control) พบว่าค่า TN มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0-0.001 สำหรับผลการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สูตรผสม (สูตร 3/สูตร 6) ขนาดเม็ดลูกดิน (0.5x0.5x0.5 cm/1.0x1.0x1.0 cm) อุณหภูมิในการทำให้แห้ง (อุณหภูมิห้อง/75±5°C) และชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง (น้ำกลั่น/สารละลายดินสังเคราะห์) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TN ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย (ความเข้มข้น 10%) มีดังนี้

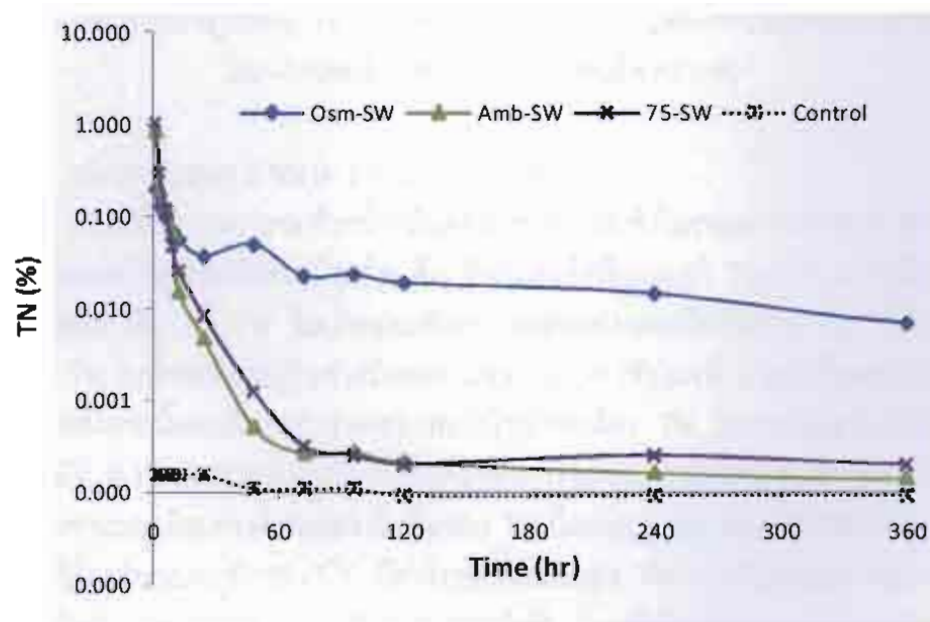
1) เม็ดลูกดินสูตร 3 ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 72 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.857-0.924 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0016-0.0017 (ชั่วโมงที่ 72) หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0002 (แผนภูมิที่ 4.11-ก) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 75±5°C มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 80.50 (24 ชั่วโมง) 80.72 (120 ชั่วโมง) และ 80.74 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 94.27 (24 ชั่วโมง) 94.62 (120 ชั่วโมง) และ 94.64 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.12)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 72 ชั่วโมงแรกของการทดสอบและมีค่าต่ำกว่าสภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.848-1.036 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0002-0.0003 (ชั่วโมงที่ 72) หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.11-ข) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 75±5°C มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 81.01 (24 ชั่วโมง) 81.11 (120 ชั่วโมง) และ 81.13 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 78.95 (24 ชั่วโมง) 79.02 (120 ชั่วโมง) และ 79.04 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.12)

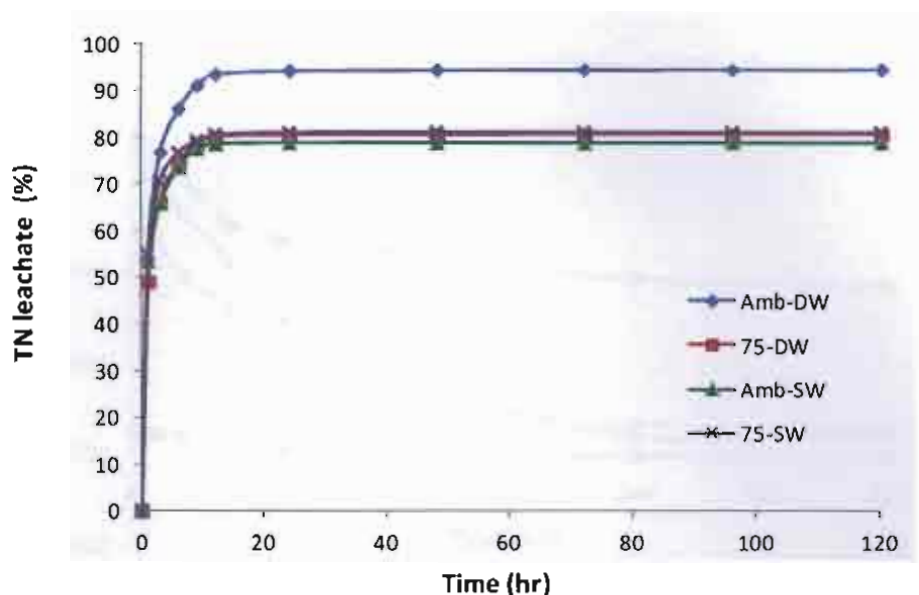


(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)



(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

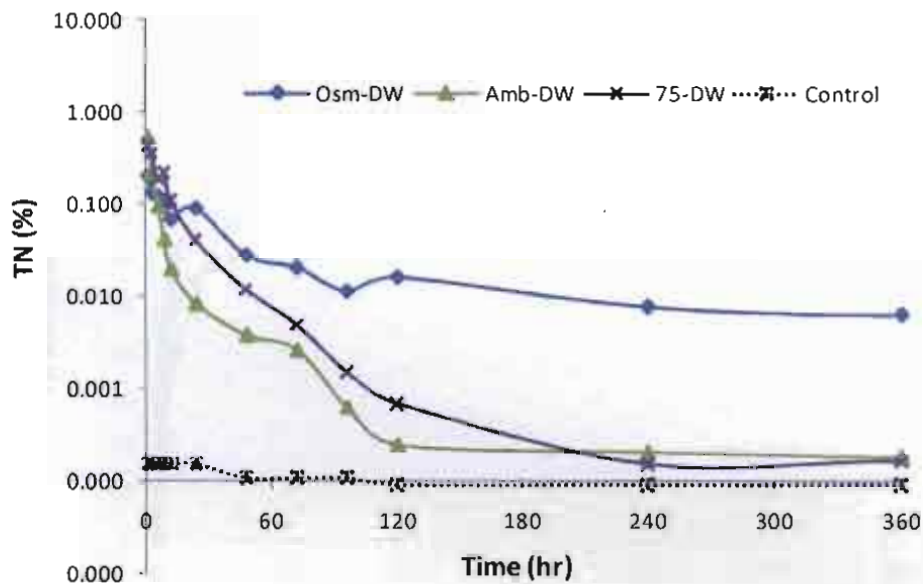
แผนภูมิที่ 4.11 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$; Osm=Osmocote;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)



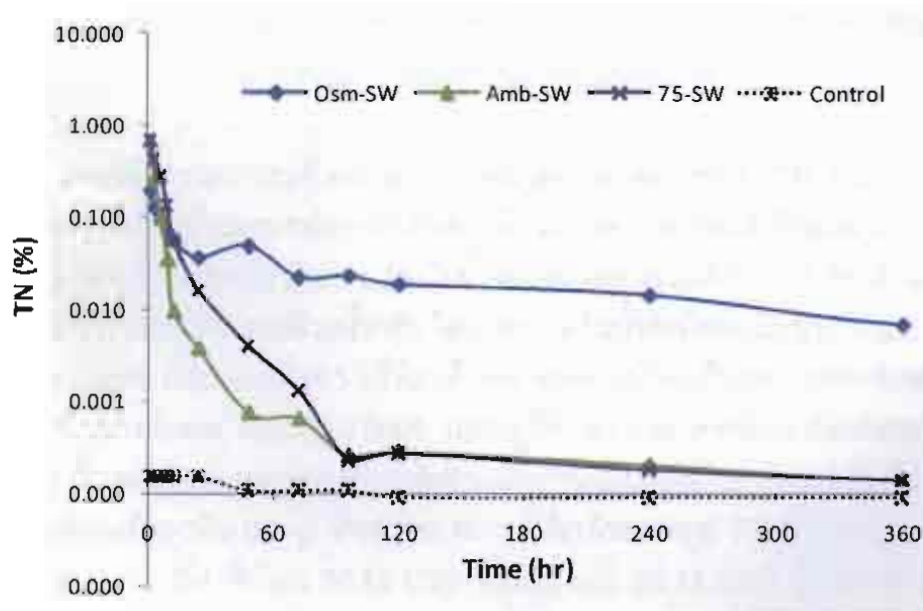
แผนภูมิที่ 4.12 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;
 SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)

2) เม็ดลูกดินสูตร 3 ขนาด 1.0x1.0x1.0 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 96 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.437-0.538 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0006-0.0015 (ชั่วโมงที่ 96) หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.13-ก) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 68.96 (24 ชั่วโมง) 69.93 (120 ชั่วโมง) และ 69.94 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 60.27 (24 ชั่วโมง) 60.74 (120 ชั่วโมง) และ 60.77 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.14)

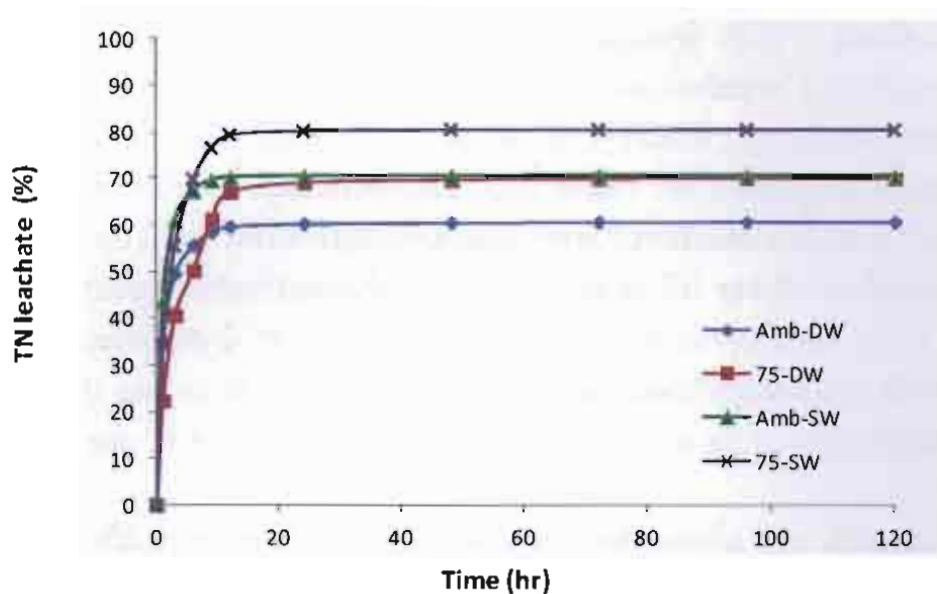


(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)



(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.13 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$; Osm=Osmocote;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมิดด้วยน้ำกลั่น)



แผนภูมิที่ 4.14 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0x1.0x1.0 cm)
(Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;
SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 96 ชั่วโมงแรกของการทดสอบและมีค่าต่ำกว่าสภาวะการชะด้วยน้ำกลั่น โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.666-0.672 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0002-0.0003 (ชั่วโมงที่ 96) หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.13-ข) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 80.11 (24 ชั่วโมง) 80.41 (120 ชั่วโมง) และ 80.43 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 70.40 (24 ชั่วโมง) 70.53 (120 ชั่วโมง) และ 70.55 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.14)

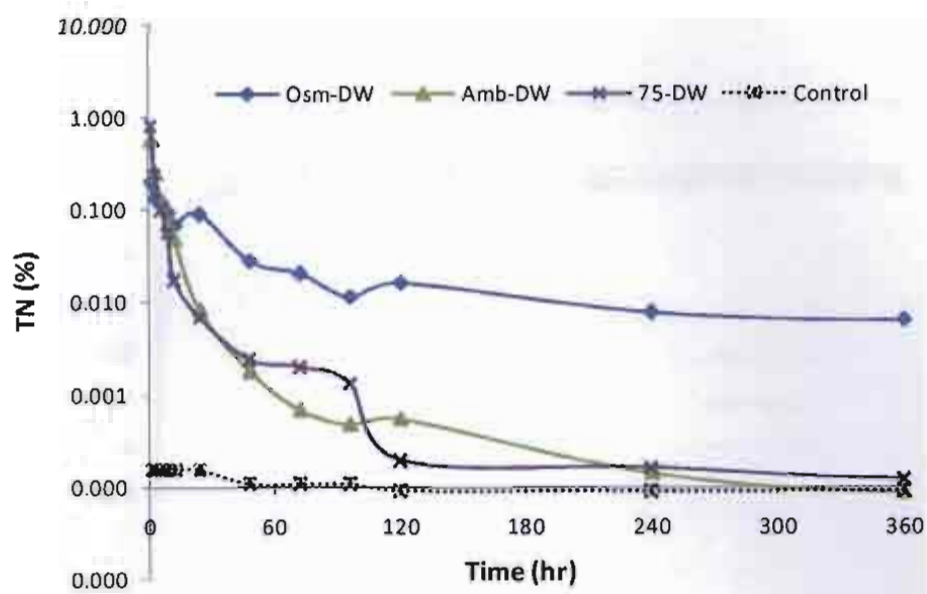
3) เม็ดลูกดินสูตร 6 ขนาด 0.5x0.5x0.5 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 120 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.588-0.823 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0002-0.0005 (ชั่วโมงที่ 120) หลังจากนั้นจนสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.15-ก) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 65.13 (24 ชั่วโมง) 65.44 (120 ชั่วโมง) และ 65.45 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 68.48 (24 ชั่วโมง) 68.69 (120 ชั่วโมง) และ 68.71 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.16)

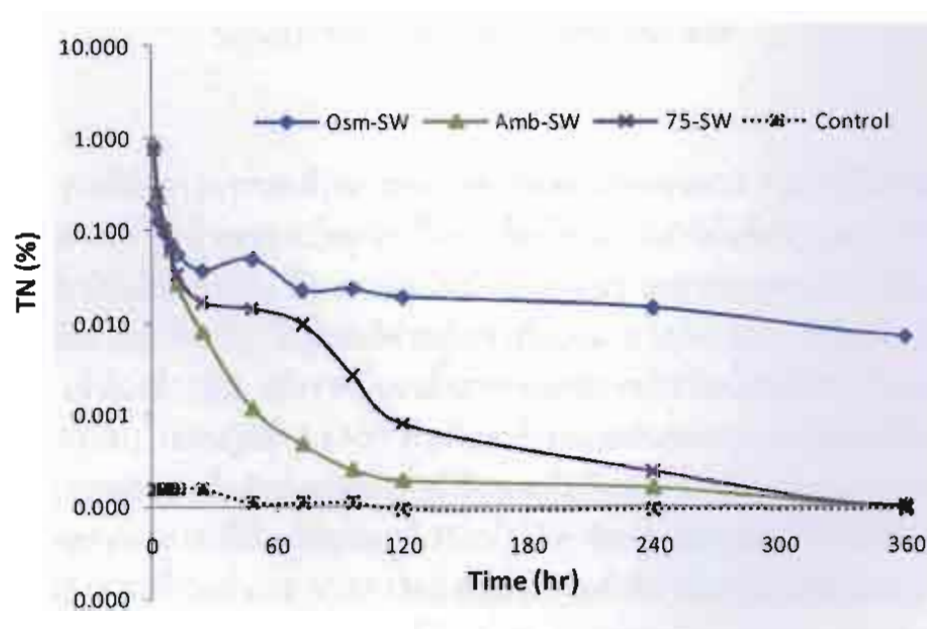
ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 120 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.773-0.890 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0002-0.0008 (ชั่วโมงที่ 120) หลังจากนั้นจนสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.15-ข) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 65.25 (24 ชั่วโมง) 66.65 (120 ชั่วโมง) และ 66.67 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 83.07 (24 ชั่วโมง) 83.20 (120 ชั่วโมง) และ 83.22 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.16)

4) เม็ดลูกดินสูตร 6 ขนาด 1.0x1.0x1.0 cm

ภายใต้สภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 120 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.392-0.459 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0002-0.0003 (ชั่วโมงที่ 120) หลังจากนั้นจนสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.17-ก) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ $75\pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 63.11 (24 ชั่วโมง) 64.71 (120 ชั่วโมง) และ 64.72 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 59.89 (24 ชั่วโมง) 60.18 (120 ชั่วโมง) และ 60.20 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.18)

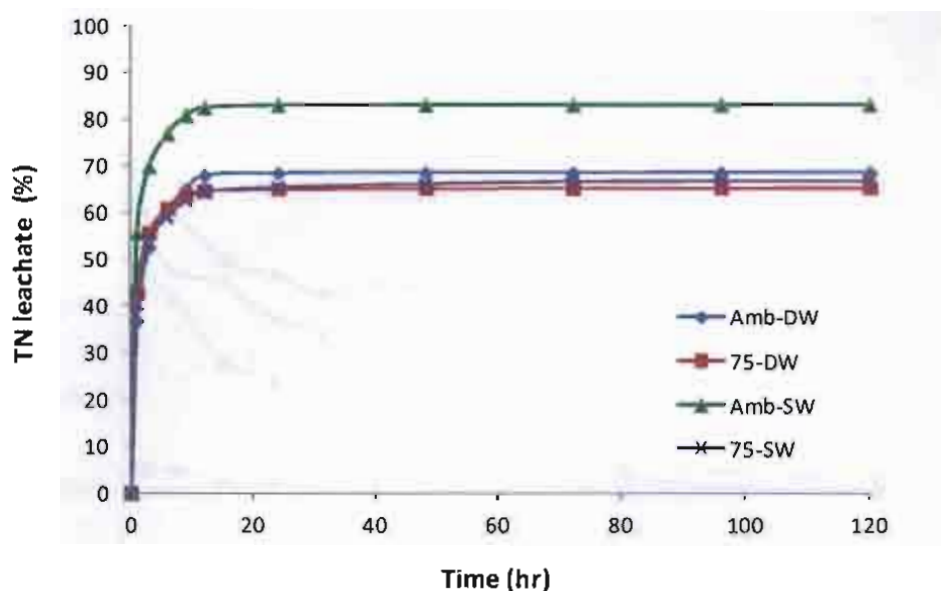


(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)



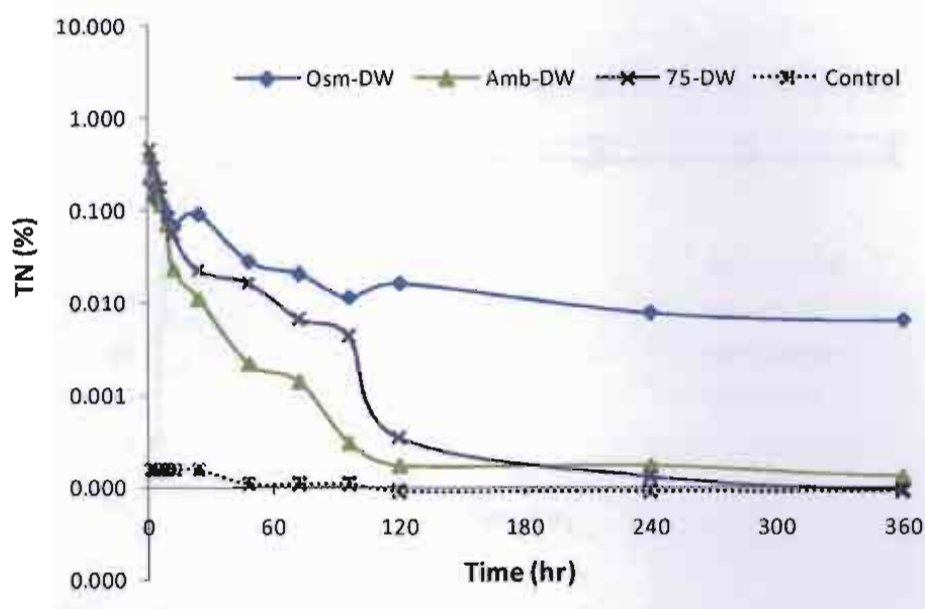
(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.15 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$; Osm=Osmocote;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)

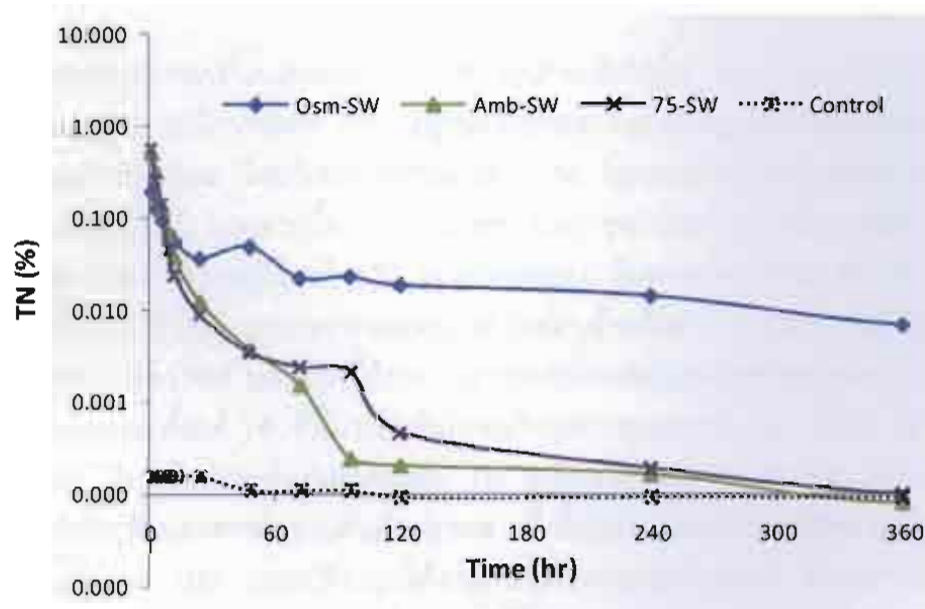


แผนภูมิที่ 4.16 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5x0.5x0.5 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;
 SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)

ภายใต้สภาวะการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดช่วง 720 ชั่วโมงของการทดสอบ พบว่าการเปลี่ยนค่า TN ในน้ำชะของเม็ดลูกดินทั้งสองเงื่อนไข คือ ที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และที่อุณหภูมิห้อง มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน คือ ค่า TN ในน้ำชะจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 120 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดย ค่า TN ในน้ำชะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.510-0.563 (ชั่วโมงที่ 1) และร้อยละ 0.0002-0.0005 (ชั่วโมงที่ 120) หลังจากนั้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองพบว่าในน้ำชะมีค่า TN ลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.0000-0.0001 (แผนภูมิที่ 4.17-ข) สำหรับค่าร้อยละสะสมของการชะปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อคำนวณเทียบกับค่าร้อยละเริ่มต้นของ TN (โดยมวลแห้ง) ของปริมาณเม็ดลูกดิน (80 g) ที่ทดสอบ พบว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 60.05 (24 ชั่วโมง) 60.53 (120 ชั่วโมง) และ 60.55 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ และที่เงื่อนไขอุณหภูมิห้อง มีค่าร้อยละสะสมของ TN เท่ากับร้อยละ 75.33 (24 ชั่วโมง) 75.72 (120 ชั่วโมง) และ 75.74 (360 ชั่วโมง) ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.18)

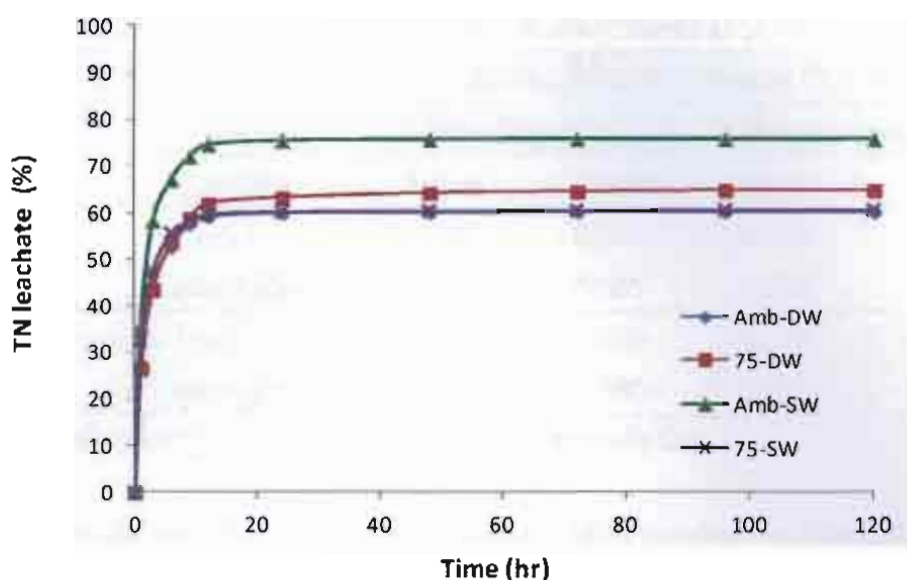


(ก) การชะล้างโดยน้ำกลั่น (DW)



(ข) การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์ (SW)

แผนภูมิที่ 4.17 การปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm)
 (Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C; Osm=Osmocote;
 Control=เม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการอิมมัวด้วยน้ำกลั่น)



แผนภูมิที่ 4.18 ร้อยละสะสมการปลดปล่อย TN ของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0x1.0x1.0 cm)
(Amb=แห้งที่อุณหภูมิห้อง; 75=แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$; DW=การชะล้างโดยน้ำกลั่น;
SW=การชะล้างโดยสารละลายดินสังเคราะห์)

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า TN ในน้ำชะที่เกิดขึ้น ระหว่างชุดการทดลองเม็ดลูกดิน และ Osmocote พบว่ากรณีการชะค่า TN ในทุกชุดการทดลองของเม็ดลูกดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดยร้อยละสะสมของค่า TN ที่ถูกชะออกมาเฉลี่ยสูงถึง 64.60 ± 7.307 - 83.68 ± 7.112 ของค่าเริ่มต้น นอกจากนี้ค่า TN ในน้ำชะของทุกชุดการทดลอง (เม็ดลูกดิน) ลดต่ำลงและมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.001 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 120 ของการทดสอบ ในทางตรงกันข้าม ค่า TN ในน้ำชะของ Osmocote ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ พบว่าค่อนข้างต่ำมาก (0.10-0.20%) เมื่อเทียบกับค่าปริมาณ TN เริ่มต้น ($N \approx 13\%$) นอกจากนี้ยังพบว่าการปลดปล่อยหรือการชะธาตุอาหาร (TN) ในชุดการทดลองของ Osmocote ตั้งแต่ 24 ชั่วโมงเป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทดลองที่ 720 ชั่วโมง (1 เดือน) ยังคงปลดปล่อยปริมาณ TN ได้อย่างสม่ำเสมอโดยมีค่า TN อยู่ในช่วงประมาณ 60-500 mg/kg ทั้งภายใต้เงื่อนไขการชะด้วยน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากสมบัติของปุ๋ยยูเรียที่สามารถละลายน้ำได้เกือบร้อยละ 100 และเปลี่ยนรูปได้ง่ายภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ จึงส่งผลให้เกิดการชะค่า TN อย่างรวดเร็วภายใต้การทดสอบแบบต่อเนื่อง และที่สิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมง หรือ 1 เดือน) พบว่าปุ๋ยยูเรียในวัสดุเม็ดลูกดินได้ถูกชะออกไปจนหมดเกือบร้อยละ 100 เนื่องจากปริมาณ TN ที่คงเหลืออยู่ในวัสดุเม็ดลูกดินภายหลังการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.055-0.080 (ตารางที่ 4.7) ใกล้เคียงกับค่า TN เริ่มต้นในวัสดุเม็ดลูกดินก่อนเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย (unmodified with urea) ที่ขณะที่สารเคลือบ (เรซิน) ของ Osmocote ทำหน้าที่ควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าภายใต้สภาวะการชะล้าง [24,25,26] ทั้งกรณีที่เป็นน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์

ตารางที่ 4.7 ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ในเม็ดลูกดินที่สิ้นสุดการทดลองภายใต้สภาวะการชะล้าง เงื่อนไขการทดลอง					
		ค่า TN (%) ที่สิ้นสุดการทดลอง (720 hr)			
		เม็ดลูกดินสูตร 3		เม็ดลูกดินสูตร 6	
สภาวะการชะ	อุณหภูมิ	5mm	10mm	5mm	10mm
น้ำกลั่น	75±5 °C	0.060	0.075	0.055	0.065
(DW)	อุณหภูมิห้อง	0.070	0.065	0.075	0.065
สารละลายดินสังเคราะห์	75±5 °C	0.065	0.080	0.070	0.065
(SW)	อุณหภูมิห้อง	0.060	0.080	0.075	0.075
หมายเหตุ: วิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาเชียงใหม่					

ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ พบว่าทุกปัจจัยที่ทดสอบ ได้แก่ สูตรผสม ขนาดของเม็ดลูกดิน ชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง และอุณหภูมิในการทำแห้ง (อุณหภูมิห้อง; 75±5 °C) มีอิทธิพลต่อการชะและค่า TN ในน้ำชะที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 24 ชั่วโมงแรก (1 วัน) ของการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Khan et al. (2008) ที่รายงานว่าการชะด้วยสารละลายดินสังเคราะห์ส่งผลให้ค่า TN ถูกชะออกมาสูงกว่าการชะด้วยน้ำกลั่น โดยเฉพาะในช่วงแรกของการทดลองและค่า TN ที่ถูกชะออกมาจะเริ่มมีค่าค่อนข้างคงที่และต่อเนื่องภายหลังจากชั่วโมงที่ 72 ของการทดสอบจนถึงชั่วโมงที่ 360 และเนื่องจากปัจจัยด้านสูตรผสม ขนาด และอุณหภูมิในการทำแห้งของเม็ดลูกดิน มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความชื้น ความพรุนตัว พื้นที่ผิวจำเพาะ และสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่า pH CEC และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น ซึ่งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีดังกล่าวล้วนส่งผลต่อการตรึงหรือการชะปริมาณ TN ออกจากเม็ดลูกดินที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าการประยุกต์ใช้วัสดุเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียเข้มข้นร้อยละ 10 (modified with urea) เป็นตัวกลางสำหรับการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ จะไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละสะสมการปลดปล่อยค่า N กับมาตรฐานปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow release) ของยุโรปที่กำหนดให้ร้อยละสะสมการปลดปล่อย N ต้องไม่เกินร้อยละ 15 ที่ 24 ชั่วโมง และมาตรฐานปุ๋ยควบคุมปลดปล่อย (controlled release) ของอเมริกาและญี่ปุ่น ได้กำหนดให้ร้อยละสะสมการปลดปล่อย N ต้องไม่เกินร้อยละ 40 ที่ 24 ชั่วโมง [52] อย่างไรก็ตามการชะค่า TN ออกจากวัสดุเม็ดลูกดินยังคงช้ากว่าปุ๋ยยูเรียซึ่งละลายน้ำได้เกือบร้อยละ 100

4.4 การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการบ่มดิน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เคมี และพลวัตของธาตุอาหาร (N) ภายใต้การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินที่สภาวะการบ่มดิน (soil incubation) ในห้องปฏิบัติการ จำนวน 6 ชุดการทดลอง (แผนการทดลองระยะที่ 4) เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยศึกษาเงื่อนไขการเตรียมเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6) ทั้งสองขนาด (ท่อนลูกบาศก์ ขนาด 0.5×0.5×0.5 cm และ 1×1×1 cm) ที่เงื่อนไขการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 75±5 °C และทำการศึกษเปรียบเทียบกับปุ๋ยยูเรีย ทั้งนี้ได้ควบคุมค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ TN ประมาณร้อยละ 0.25 นอกจากนี้ เม็ดลูกดิน (สูตร 3 ขนาด 0.5×0.5×0.5 cm) ที่ไม่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย ถูกกำหนดเป็นชุดควบคุม (Control) ของการศึกษานี้ ผลการทดสอบดังแสดงในหัวข้อที่ 4.4.1-4.4.7 ตามลำดับ

4.4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทดลอง

ดินที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้เป็นชุดดินสนทราย (กลุ่มชุดดินที่ 22) ซึ่งเก็บจากแปลงทดลองที่ระดับความลึก 5-20 cm จากผิวดิน ศูนย์วิจัยฝึกอบรมและสาธิตการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ลักษณะเนื้อดินเป็นดินปนทราย โดยมีปริมาณอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวรวมกันสูงถึงประมาณร้อยละ 75.8 ดินมีสีน้ำตาลปนเทา จัดเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ค่าอินทรีย์วัตถุ (OM) ประมาณร้อยละ 2.24 มีค่าปฏิกิริยาดิน (pH 5.36) เป็นกรดปานกลาง ไม่มีปัญหาความเค็ม ($EC\ 14.16 < 400\ \mu S/cm$) [39] และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุปานกลาง ($CEC\ 22.69\ cmol(e)/kg$) โดยผลวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินที่ใช้ในการทดลอง (ชุดดินสนทราย กลุ่มชุดดินที่ 22)

รายการ	สมบัติทางเคมี						
	pH	OM (%)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	EC ($\mu S/cm$)	CEC (cmol(e)/kg)
ข้อมูลการทดลอง	5.36	2.24	0.11	11.33	50.00	14.16	22.69
[Ref-1] ดินชั้นบน	5-6	0.40	0.200	2.2	25	-	-
ดินชั้นล่าง	6-7	0.30	0.150	2.1	24	-	-
[Rer-2]	6.97	2.79	0.135	46.67	210	-	-
รายการ	สมบัติทางกายภาพ						
	MC (%)	Gs	Grain size analysis				
			Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)		
ข้อมูลการทดลอง	3.06	2.63	24.2	30	45.8		
[Ref-1] ดินชั้นบน	-	-	-	-	-		
ดินชั้นล่าง	-	-	-	-	-		
[Rer-2]	-	-	-	-	-		

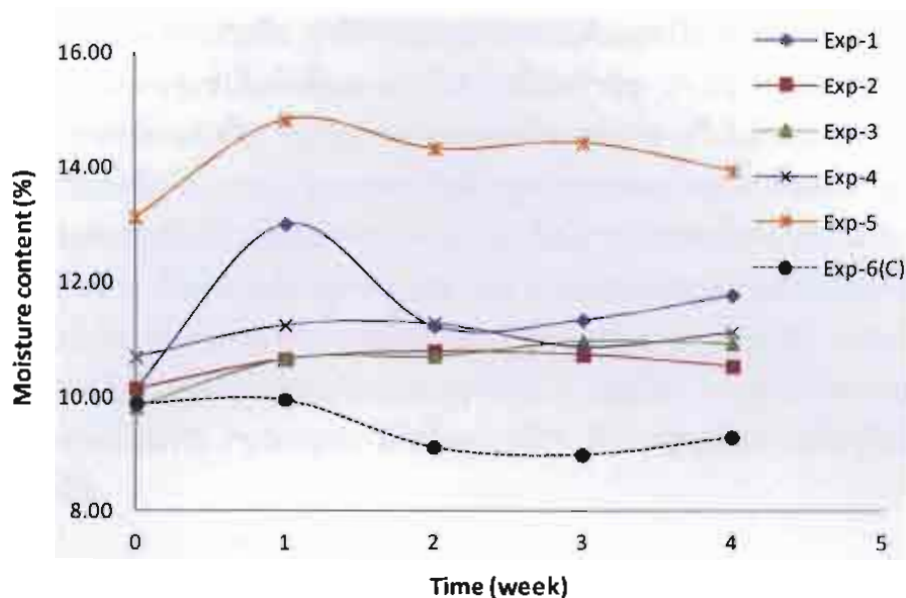
หมายเหตุ: Reference 1 www.doae.go.th (2011)

Reference 2 โยธิน อนาสีห์ (2534)

4.4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของดิน

ในขั้นตอนก่อนการทดลองได้ทำการเตรียมดินโดยการบ่มดินก่อนการทดลองเป็นเวลา 1 สัปดาห์ (ความชื้นเริ่มต้นของดินที่บ่มก่อนการทดลองประมาณร้อยละ 18 ± 2) ดังรายละเอียดในระเบียบวิธีการวิจัย (ระยะที่ 4) ภายหลังการผสมดินที่บ่มแล้วเสร็จตามกำหนดกับวัสดุเม็ดลูกดินและปุ๋ยยูเรียพบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าปริมาณความชื้นเริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 9-14 (แผนภูมิที่ 4.19) โดยชุดการทดลองปุ๋ยยูเรีย (Exp-5) มีค่าความชื้นสูงสุด ($13.10\% \pm 0.24$) ขณะที่ค่าความชื้นในชุดการทดลองเม็ดลูกดินที่ไม่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียหรือชุดควบคุม (Exp-6) พบว่ามีค่าต่ำสุด ($9.88\% \pm 0.27$) ตลอดการทดสอบ (สัปดาห์ที่ 0-4) พบว่า ค่าความชื้นในชุดการทดลองเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรีย (Exp-1 ถึง Exp-4) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้น โดยชุดการทดลองปุ๋ยยูเรีย (Exp-5)

มีค่าความชื้นสูงสุดอยู่ในช่วงร้อยละ $13.92 \pm 0.48 - 14.80 \pm 0.47$ ยกเว้นชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) ที่ค่าความชื้นค่อนข้างคงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในช่วงร้อยละ $9.12 \pm 0.30 - 9.95 \pm 0.15$



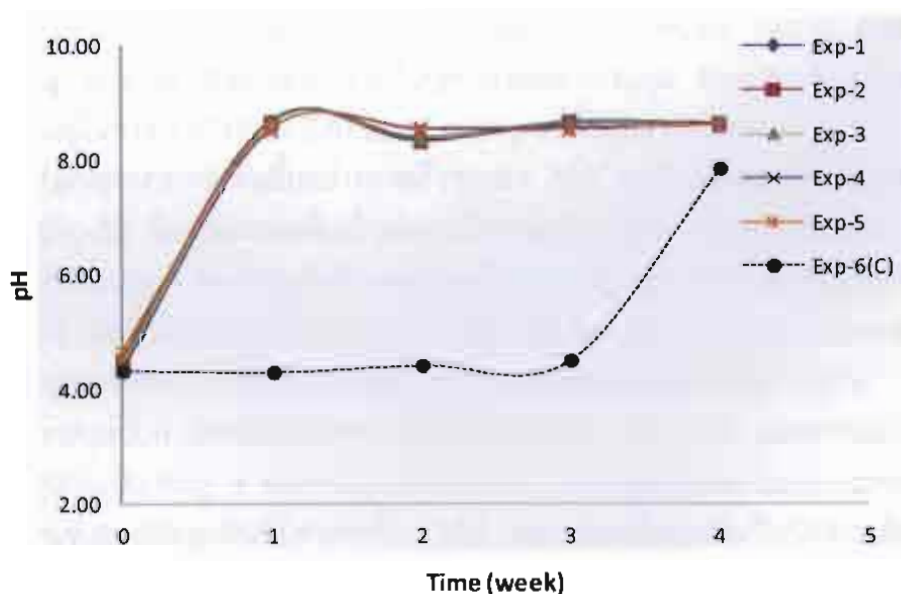
แผนภูมิที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ 20 ± 2 °C

การลดลงของค่าความชื้นเริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) ภายหลังการผสมเม็ดลูกดินในทุกชุดการทดลอง ยกเว้นชุดการทดลองปุ๋ยยูเรีย (Exp-5) อาจเป็นผลเนื่องจากการดูดซับความชื้นโดยเม็ดลูกดินทำให้ค่าความชื้นในดินลดลงประมาณร้อยละ 4-5 เนื่องจากความชื้นเป็นปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญปัจจัยหนึ่งต่อกระบวนการย่อยสลายในดิน ปริมาณความชื้นนอกจากจะส่งผลต่อความพรุนและความหนาแน่นของเนื้อดินแล้วยังส่งผลต่อกระบวนการ hydrolysis และกระบวนการ mineralization โดยจุลินทรีย์ในดิน โดยเฉพาะขั้นตอนของกระบวนการ ammonification และ nitrification ดินควรมีค่าความชื้นและปริมาณความพรุน (อากาศ) ที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนรูปสารประกอบไนโตรเจนทางชีวเคมี เป็น NH_4^+ -N และ NO_3^- -N ตามลำดับ ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ [3,47] หาญ แสงโชติ (2551) ได้รายงานระดับความชื้นในดินที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายโดยมีค่าศักย์น้ำ (water potential) ประมาณ -0.01 ถึง -0.05 MPa ปริมาณความชื้นที่สูงกว่าอย่างต่อเนื่องในชุดการทดลองปุ๋ยยูเรีย (Exp-5) บ่งชี้ว่าปุ๋ยยูเรียสามารถสมดุลความชื้นในดินได้อย่างต่อเนื่องนานถึง 1 เดือน ถึงแม้ว่ายูเรียมีสมบัติด้านการดูดความชื้น (hygroscopic substance) อย่างไรก็ตาม ยูเรียจะเริ่มดูดความชื้นจากอากาศเข้ามาในเนื้อปุ๋ยก็ต่อเมื่ออากาศมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ประมาณร้อยละ 81 ที่อุณหภูมิทดสอบประมาณ 20 °C [21] สำหรับการศึกษาซึ่งใช้ปริมาณมวลปุ๋ยยูเรียทดสอบเพียง 1 g ต่อมวลดินทดสอบ 200g และทำการบ่มดินในระบบปิด (ตู้ควบคุมอุณหภูมิ) ดังนั้นสมบัติการดูดความชื้นของยูเรียอาจไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความชื้นในดิน ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่าเป็นผลเนื่องจากปุ๋ยยูเรียสามารถละลายน้ำได้ดี ปลดปล่อยธาตุอาหาร และเปลี่ยนรูปได้เร็วโดยเฉพาะภายใต้การควบคุมอุณหภูมิทดสอบประมาณ 20 °C [21] ดังนั้นในระหว่างกระบวนการ mineralization ของสารประกอบไนโตรเจนในปุ๋ยยูเรีย จึงอาจเกิดการชดเชยความชื้น (moisture compensation) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสู่ดิน

ส่งผลให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้นและค่อนข้างคงที่ [3] ทำนองเดียวกันกับชุดการทดลองที่ 1-4 พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากเม็ดลูกดินส่งเสริมให้เกิดกระบวนการ mineralization อย่างต่อเนื่องและสามารถสมดุลความชื้นในสัปดาห์ที่ 2-4 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น บ่งชี้ว่าระยะเวลาการบ่มดินและเงื่อนไขชุดการทดลองที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) นอกจากนี้ภายใต้เงื่อนไขมวลแห้งของเม็ดลูกดินที่มีค่าเท่ากัน (25g) ขนาดของเม็ดลูกดินที่ต่างกันไม่ส่งผลต่อค่าความชื้นของดิน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ในทางตรงกันข้ามสูตรผสมของเม็ดลูกดินที่แตกต่างกลับส่งผลให้ค่าความชื้นของดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากปริมาณรุกรุน ขนาดรุกรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ ที่แตกต่างกัน (สูตร 3 และ สูตร 6) จึงส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่ดูดซับไว้ในเม็ดลูกดิน สำหรับแนวโน้มการลดลงของค่าความชื้นในชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) อาจเป็นผลเนื่องจากกิจกรรมการย่อยสลายในดินถูกจำกัดด้วยปริมาณธาตุอาหาร (ยูเรีย) ทำให้กิจกรรมการย่อยสลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการ hydrolysis เกิดขึ้นอย่างช้าๆ จึงอาจสูญเสียความชื้นสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าชุดการทดลองอื่น

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของดิน

ภายหลังการเตรียมดินก่อนการทดลอง พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าปฏิกิริยาดินหรือค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) ค่อนข้างเป็นกรดอยู่ในช่วงประมาณ 4-5 (แผนภูมิที่ 4.20) โดยทุกชุดการทดลอง (Exp-1 ถึง Exp-5) ยกเว้นชุดการทดลองควบคุม พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่า pH (pH 8-9) อย่างรวดเร็วในสัปดาห์ที่ 1 ของการทดลอง และค่า pH ค่อนข้างคงที่ในช่วง 8.33 $\pm$ 0.01-8.69 $\pm$ 0.03 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 4) ในทางตรงกันข้าม กลับพบว่าค่า pH ในชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) มีค่าค่อนข้างเป็นกรด (pH 4-5) ตลอดสัปดาห์ที่ 0-3 ก่อนที่ค่า pH จะค่อยเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 7.84 $\pm$ 0.65 ในสัปดาห์ที่ 4



แผนภูมิที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ 20 $\pm$ 2 °C

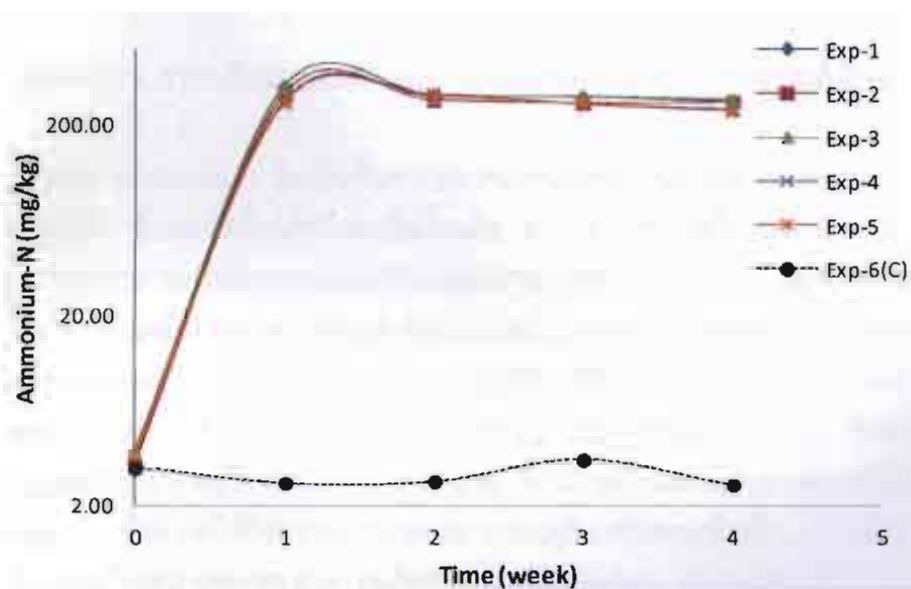
การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า pH หรือค่าปฏิกิริยาดินในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) เป็นผลเนื่องจากกระบวนการ mineralization ของปุ๋ยยูเรียที่ย่อยสลายเป็น NH_3^+-N และเมื่อดินมีความชื้นจึงละลายอยู่ในรูปไอออนของ NH_4^+-N ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ภายใต้ปรากฏการณ์นี้หากดินมีความพรุนสูงก็อาจสูญเสียธาตุไนโตรเจนในรูปของก๊าซ NH_3^+-N ได้ง่าย [3,48] แม้ว่าที่สิ้นสุดการสังเกตการณ์ (1 เดือน) ค่า pH ที่ยังคงสูงอยู่ในช่วง 8-9 บ่งชี้ว่ากระบวนการ mineralization ของปุ๋ยยูเรียยังคงดำเนินอยู่อย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม สำหรับชุดการทดลองควบคุม การเพิ่มสูงขึ้นของค่า pH (7-8) ภายหลังสัปดาห์ที่ 3 เป็นต้นไป อาจเป็นผลเนื่องจากกิจกรรมการย่อยสลายในดินถูกจำกัดด้วยปริมาณธาตุอาหาร (ยูเรีย) และความชื้นที่ต่ำ (9-10%) ดังนั้นจึงต้องการระยะเวลาในการปรับตัว (lag phase) ของจุลินทรีย์ในดิน ส่งผลให้กระบวนการ mineralization และการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาของดินดำเนินไปอย่างช้าๆ [3,48] จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติไม่พบความแตกต่างของค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ระหว่างชุดการทดลองที่ทดสอบ (Exp-1, Exp-2 Exp-3 Exp-4 Exp-5) แต่ระยะเวลาในการบ่มดินที่ต่างกันส่งผลให้ค่า pH แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) เนื่องจากค่า pH หรือปฏิกิริยาดินเป็นสมบัติทางเคมีที่สำคัญและส่งผลต่อความอุดมสมบูรณ์รวมทั้งกิจกรรมการย่อยสลายในดิน โดยปกติค่า pH ของดินค่อนข้างกว้างอยู่ในช่วง 5-9 สำหรับดินที่ค่อนข้างเป็นกรดอาจมีค่า pH อยู่ในช่วง 4-5 และดินที่ค่อนข้างเป็นด่างอาจมีค่า pH อยู่ในช่วง 8-9 สำหรับค่า pH ของดินที่เหมาะสมต่อกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินและการเพาะปลูกควรอยู่ในช่วง 6.5-7.8 [38]

4.4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าแอมโมเนียมไนโตรเจน (NH_4^+-N)

การศึกษาพบว่าทุกชุดการทดลองมีค่า NH_4^+-N เริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) ค่อนข้างใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 3.21 ± 0.24 - 3.89 ± 0.18 mg/kg (แผนภูมิที่ 4.21) หลังจากนั้น ในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่า NH_4^+-N อย่างรวดเร็วในสัปดาห์ที่ 1 โดยมีค่าประมาณ 260 ± 5.15 - 316 ± 8.02 mg/kg และตลอดช่วงสัปดาห์ที่ 2-4 พบว่าค่า NH_4^+-N มีแนวโน้มลดลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 267 ± 6.66 - 286 ± 13.05 mg/kg (Exp-1) 258 ± 4.02 - 269 ± 5.69 mg/kg (Exp-2) 268 ± 12.17 - 280 ± 19.22 mg/kg (Exp-3) 242 ± 18.01 - 289 ± 11.93 mg/kg (Exp-4) และ 235 ± 7.61 - 283 ± 8.89 mg/kg (Exp-5) ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) พบว่า ค่า NH_4^+-N แปรปรวนเล็กน้อยอยู่ในช่วง 2.57 ± 0.07 - 3.47 ± 1.12 mg/kg จนถึงสิ้นสุดการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงและการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า NH_4^+-N ในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่า pH หรือปฏิกิริยาดิน เนื่องจากเกิดกระบวนการ mineralization ของปุ๋ยยูเรียที่ย่อยสลายเป็น NH_3^+-N และ NH_4^+-N ตามลำดับ ส่งผลให้ค่า NH_4^+-N และค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับแนวโน้มการลดลงของค่า NH_4^+-N ตามระยะเวลาการบ่มดินที่นานขึ้นในทุกชุดการทดลอง อาจเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซ NH_3^+-N โดยกระบวนการ volatilization ภายใต้เงื่อนไขความชื้นที่ค่อนข้างต่ำ (10-15%) และการออกซิเดชันไอออน NH_4^+-N บางส่วนกลายเป็น NO_2^--N และ NO_3^--N ตามลำดับ [3,48] ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติบ่งชี้ว่า ภายใต้เงื่อนไขมวลแห้งของเม็ดลูกดินที่มีค่าเท่ากัน (25g) ขนาดของเม็ดลูกดินเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่า NH_4^+-N แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ขณะที่สูตรผสมของเม็ดลูกดินที่แตกต่างกัน (สูตร 3 และสูตร 6) ไม่ส่งผลให้ค่า NH_4^+-N แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจากวัสดุเม็ดลูกดินที่มีขนาดใหญ่กว่า ($1.0\times1.0\times1.0$ cm) ในชุดการทดลองที่ 2 และ 4 เมื่อถูกคลุกเคล้าผสมในดินอาจส่งผลให้

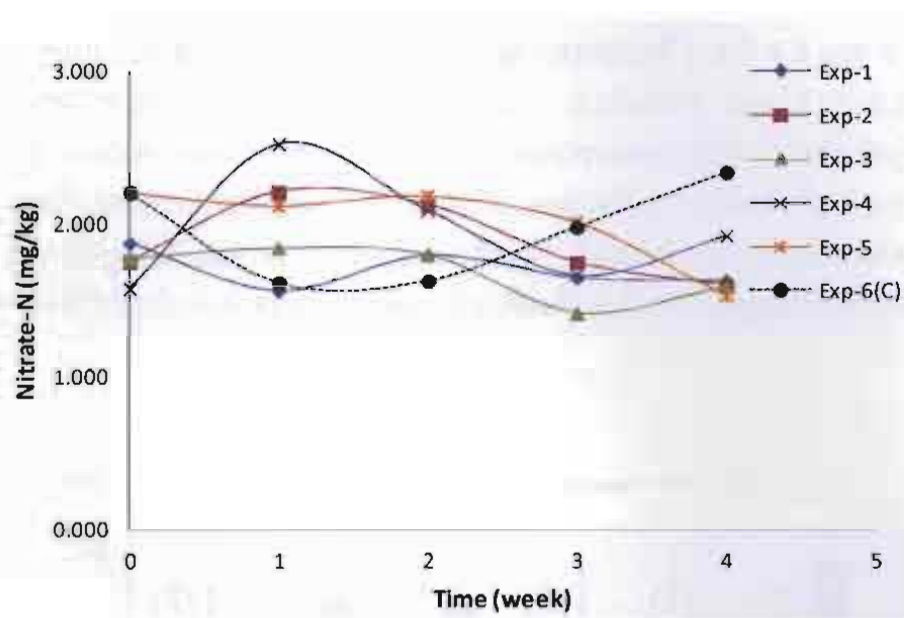
เกิดความพรุนและช่องว่างอากาศในเนื้อดินสูงกว่าวัสดุเม็ดลูกดินที่มีขนาดเล็กกว่า ($0.5 \times 0.5 \times 0.5$ cm) ในชุดการทดลองที่ 1 และ 3 จึงเอื้อต่อเงื่อนไขการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซ NH_3^+-N โดยกระบวนการ volatilization ได้ง่ายกว่า ดังนั้น ค่า NH_4^+-N จึงมีค่าต่ำกว่าและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้รูปแบบการปลดปล่อยไนโตรเจนระหว่างปุ๋ยยูเรียที่อยู่ในเม็ดลูกดินและการใช้ปุ๋ยยูเรียโดยตรง รวมทั้งสัปดาห์การบ่มดินที่นานขึ้นพบว่าส่งผลให้ค่า NH_4^+-N ในดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) สำหรับชุดการทดลองควบคุม การแปรปรวนของค่า NH_4^+-N ในช่วงแคบ ($2-4$ mg/kg) อาจเป็นผลเนื่องจากกิจกรรมการย่อยสลายในดินถูกจำกัดด้วยปริมาณธาตุอาหาร (ยูเรีย) และปริมาณความชื้นที่ค่อนข้างต่ำ ($9-10\%$) จึงส่งผลต่อกระบวนการ mineralization และการเปลี่ยนรูปของยูเรียที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ [3,48] กระบวนการ ammonification เป็นกระบวนการสำคัญของการเตรียมแหล่งธาตุไนโตรเจนสำหรับการนำไปใช้โดยพืชในกระบวนการต่อไป (nitrification process) ดินโดยทั่วไปอาจมีปริมาณ NH_4^+-N อยู่ในช่วง $2-10$ mg/kg [50] ดังนั้น การศึกษานี้ วัสดุเม็ดลูกดินที่ถูกเตรียมด้วยสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 จึงสามารถใช้เป็นแหล่งธาตุไนโตรเจนและปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนให้แก่ดินได้อย่างเพียงพอ (NH_4^+-N $200-400$ mg/kg)



แผนภูมิที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงค่า NH_4^+-N ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20 \pm 2^\circ\text{C}$

4.4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทไนโตรเจน (NO_3^--N)

การศึกษาพบว่าทุกชุดการทดลองมีค่า NO_3^--N เริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 0) อยู่ในช่วงประมาณ $1.570 \pm 0.07 - 2.203 \pm 0.40$ mg/kg (แผนภูมิที่ 4.22) หลังจากสัปดาห์ที่ 1 เป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 4) พบว่าค่า NO_3^--N ในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองปุ๋ยยูเรีย (Exp-5) แปรปรวนอยู่ในช่วง $1.560 \pm 0.16 - 2.330 \pm 0.21$ mg/kg ขณะที่ชุดการทดลองปุ๋ยยูเรียเป็นเพียงเงื่อนไขเดียวที่ค่า NO_3^--N มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการบ่มดินที่นานขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 1.527 ± 0.07 mg/kg ที่สิ้นสุดการทดลอง

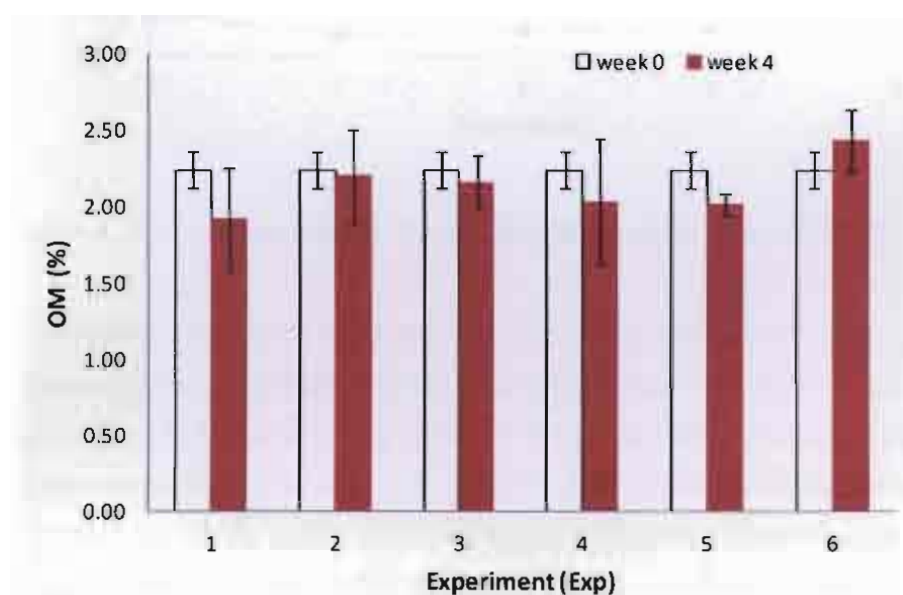


แผนภูมิที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงค่า NO_3^- -N ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20 \pm 2^\circ\text{C}$

กระบวนการ nitrification ถือเป็นขั้นการออกซิเดชันสูงสุด (highest oxidation state) สำหรับไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ดีก็ต่อเมื่อเงื่อนไข ค่า pH ควรอยู่ในช่วง 6-8 ปริมาณความชื้นออกซิเจน และสารอาหาร ควรเหมาะสมและเพียงพอต่อการเปลี่ยนรูปอามอนของ NH_4^+ -N กลายเป็น NO_2^- -N และ NO_3^- -N ทางชีวเคมี [38] โดยปกติแล้วปริมาณ NO_3^- -N จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการย่อยสลายที่นานขึ้น ตลอดระยะเวลาการบ่มดินนาน 1 เดือน (สัปดาห์ที่ 1-4) พบว่าค่าความเข้มข้นของ NO_3^- -N ในทุกชุดการทดลอง (Exp-1 ถึง Exp-6) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) โดยมีค่าค่อนข้างต่ำ ($< 10 \text{ mg/kg}$) และแปรปรวนอยู่ในช่วง $1.5\text{-}2.4 \text{ mg/kg}$ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากความชื้นในดินค่อนข้างต่ำ (9-15%) จึงจำกัดให้กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ค่อนข้างช้า (อัตรากระบวนการ mineralization ค่อนข้างต่ำ) ประกอบกับอาจเกิดการตรึงปริมาณ NO_3^- -N บางส่วนเข้าไว้ในเซลล์จุลินทรีย์ โดยกระบวนการ immobilization ทำให้ค่า NO_3^- -N แปรปรวนและมีค่าลดลงเล็กน้อย [3,48,50] ดังนั้นในการประยุกต์ใช้เม็ดลูกดินเพื่อทำหน้าที่ปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่ดิน ข้อคำนึงที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การปรับค่าความชื้นของดิน เนื่องจากความชื้นที่ใช้ปรับบางส่วนนั้นจะถูกดูดซับไว้ในวัสดุเม็ดลูกดิน ทำให้ค่าความชื้นของดินลดต่ำกว่าระดับที่ต้องการ จึงควรมีการทดสอบหาช่วงความชื้นใช้งานที่เหมาะสมก่อนนำไปประยุกต์ใช้จริง

4.4.6 การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดิน

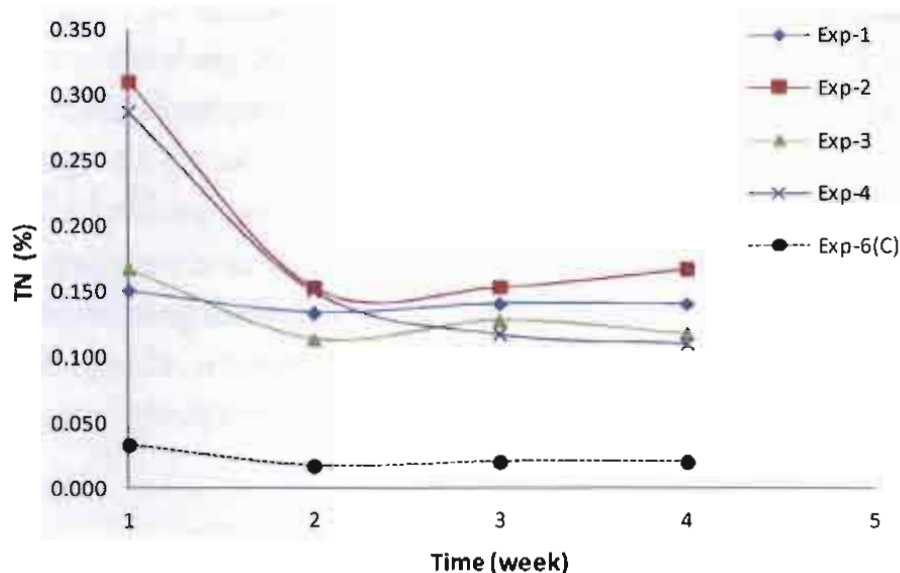
ค่าอินทรีย์วัตถุเริ่มต้นของดิน (สันทราย) ที่ใช้ในการทดลองมีค่าประมาณร้อยละ 2.24 ± 0.12 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินของชุดการทดลองที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีค่าประมาณร้อยละ 1.92 ± 0.33 , 2.20 ± 0.30 , 2.16 ± 0.17 , 2.03 ± 0.41 , 2.01 ± 0.07 และ 2.43 ± 0.21 ตามลำดับ (แผนภูมิที่ 4.23) ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติบ่งชี้ว่า ในทุกชุดการทดลองปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินที่เริ่มต้น (สัปดาห์ที่ 1) และสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 4) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการใช้ยูเรียเป็นแหล่งธาตุอาหารในการศึกษา จึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดิน ดังนั้นค่าอินทรีย์วัตถุในดินจึงค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับค่าอินทรีย์วัตถุของดินที่ใช้ทดลอง (ชุดดินสันทราย)



แผนภูมิที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงค่า OM ของดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$

4.4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของเม็ดลูกดิน

วัสดุเม็ดลูกดินก่อนการทดสอบบ่มดิน (สัปดาห์ที่ 0) สำหรับชุดการทดลองที่ 1, 2, 3, และ 4 มีค่า TN เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2.36 ± 0.127 , 2.45 ± 0.01 , 2.40 ± 0.015 , และ 2.17 ± 0.038 ภายหลังการผสมดินโดยกำหนดค่า TN เริ่มต้นของดินผสมทุกชุดการทดลองมีค่าประมาณร้อยละ 0.25 [40] และทำการบ่มดินเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าผลการวิเคราะห์เม็ดลูกดินในสัปดาห์ที่ 1 บ่งชี้ว่าค่า TN ของเม็ดลูกดินในชุดการทดลองที่ 2 และ 4 (Exp-2, Exp-4) มีค่าสูงสุดคือร้อยละ 0.287-0.310 รองลงมาได้แก่ชุดการทดลองที่ 1 และ 3 (Exp-1, Exp-3) ซึ่งมีค่า TN อยู่ในช่วงร้อยละ 0.150-0.167 และค่า TN ต่ำสุด (0.033%) พบในชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) หลังจากสัปดาห์ที่ 1 เป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 4) พบว่าค่า TN ในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองควบคุม (Exp-6) มีค่าลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.110-0.167 ขณะที่ค่า TN ของเม็ดลูกดินในชุดการทดลองควบคุมแปรปรวนเล็กน้อยในช่วงร้อยละ 0.017-0.020 (แผนภูมิที่ 4.24)



แผนภูมิที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงค่า TN ของเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการบ่มที่ $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$

การลดลงของค่า TN ในชุดการทดลองที่ 1-4 (Exp-1 ถึง Exp-4) บ่งชี้ว่าเกิดการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากวัสดุเม็ดลูกดินสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งสอดคล้องกับผลการเพิ่มขึ้นของค่า NH_4^+-N ในดินของทุกชุดการทดลอง (แผนภูมิที่ 4.21) ในสัปดาห์ที่ 1 ของการทดลอง ค่า TN ของเม็ดลูกดินในชุดการทดลองที่ 2 และ 4 ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น (Exp-1, Exp-3) ประมาณ 2 เท่า และพบว่ามีความแตกต่างจากสัปดาห์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าเป็นผลเนื่องจากขนาดของเม็ดลูกดินทั้งสองสูตร (สูตร 3 และสูตร 6) ในชุดการทดลองที่ 1 และ 3 ซึ่งมีขนาด $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ cm}$ ที่เล็กกว่าขนาด $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ cm}$ ของเม็ดลูกดินในชุดการทดลองที่ 2 และ 4 จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อมวลแห้งที่เท่ากัน (25g) ของเม็ดลูกดิน (Exp-2, Exp-4) มีค่าสูงกว่า ดังนั้นจึงอาจเกิดการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากเม็ดลูกดินสู่ดินได้อย่างทั่วถึงและรวดเร็วยิ่งขึ้นโดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์แรกของการศึกษา และส่งผลให้ค่า TN ของเม็ดลูกดินที่คงเหลือนั้นมีค่าต่ำกว่า

เนื่องจากการเปลี่ยนรูปทางเคมีของปุ๋ยยูเรียเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (สัปดาห์ที่ 0-1) ทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่มีความชื้น [26,27,45] ทั้งกรณีการปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยยูเรียในเม็ดลูกดิน (Exp-1 ถึง Exp-4) และกรณีการให้ปุ๋ยยูเรียโดยตรงกับดิน (Exp-5) ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า NH_4^+-N ในดิน จาก 3.21 ± 0.24 – $3.89 \pm 0.18 \text{ mg/kg}$ เป็น 260 ± 5.15 – $316 \pm 8.02 \text{ mg/kg}$ (แผนภูมิที่ 4.21) ถึงแม้ว่าในการคำนวณค่า TN เริ่มต้น (0.25%) ทางทฤษฎีโดยการสมมูลมวลสารของดินผสมในทุกชุดการทดลองให้มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามผลการเปลี่ยนแปลงค่า NH_4^+-N ในดินและผลการวิเคราะห์ทางสถิติ บ่งชี้ว่า รูปแบบการปลดปล่อยไนโตรเจนระหว่างปุ๋ยยูเรียที่อยู่ในเม็ดลูกดินและการให้ปุ๋ยยูเรียโดยตรงกับดินรวมทั้งสัปดาห์การบ่มดินที่นานขึ้น ล้วนส่งผลให้ค่า NH_4^+-N ในดินแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ดังนั้น การศึกษานี้ ถึงแม้ว่าภายใต้เงื่อนไขรูปแบบการปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยยูเรียที่อยู่ในเม็ดลูกดิน ส่งผลให้ค่า NH_4^+-N ในดิน มีค่าสูงกว่า (1.5-10.3%) กรณีการให้ปุ๋ยยูเรียโดยตรงเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากปุ๋ยยูเรียส่วนใหญ่ที่ถูกกักไว้ในเม็ดลูกดินจะถูก

ปลดปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่อง [26,27] ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 เป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 2-4) ดังผลการเปลี่ยนแปลงค่า TN ของเม็ดลูกดินในทุกชุดการทดลอง (แผนภูมิที่ 4.24) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) โดยที่สิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 4) พบว่าปริมาณ TN ในเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียยังคงเหลืออยู่ประมาณ 1,100-1,670 mg/kg ซึ่งมีความสูงกว่าชุดการทดลองควบคุม 5.5-8.4 เท่า ขณะที่การให้ปุ๋ยยูเรียโดยตรงกับดิน (Exp-5) เมื่อปุ๋ยยูเรียสัมผัสดินสามารถเปลี่ยนรูปได้เร็วทั้งในสถานะการระเหยเป็น NH_3^+-N (volatilization) ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ (10-15%) และการละลายเป็น NH_4^+-N บางส่วนในดิน จึงอาจส่งผลให้ค่า NH_4^+-N ในดินมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองของเม็ดลูกดินเล็กน้อย (แผนภูมิที่ 4.21) ดังนั้นผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า วัสดุเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยปุ๋ยยูเรีย สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการปลดปล่อยธาตุอาหารแบบค่อยเป็นค่อยไปได้ในระดับหนึ่งโดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์ที่ 2 ของการปลูกเป็นต้นไป

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากความต้องการพัฒนาวัสดุปลูกพืชทดแทนดินที่มีความพรุน กักเก็บความชื้น น้ำหนักเบาและสะดวกต่อการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยง่ายภายใต้ต้นทุนที่ต่ำ ประกอบกับความ ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยเคมีให้เกิดความคุ้มค่าและประโยชน์สูงสุด โดยลดข้อด้อยของการใช้ ปุ๋ยเคมีโดยตรงที่มักละลายน้ำได้ดีและเกิดการสูญเสียภายใต้การชะล้างได้ง่าย ดังนั้น โครงการวิจัยนี้มี วัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาวัสดุเม็ดลูกดินจากวัสดุธรรมชาติในท้องถิ่น สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกพืช และทำหน้าที่เป็นตัวกลางปลดปล่อยธาตุอาหารเสมือนปุ๋ยละลายช้า โดยศึกษาสภาวะการผลิตและการใช้ งานที่เหมาะสม รวมทั้งผลิตองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องในการประยุกต์ใช้ด้านปุ๋ยละลายช้าของประเทศ อันเป็น ประโยชน์ต่อฐานข้อมูลการวิจัย (ต้นน้ำ) และเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจยิ่งสำหรับเทคโนโลยีการปลูกพืช โดยไม่ใช้ดินรวมถึงการปลูกพืชไม่กระถางที่มีมูลค่า ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การพัฒนาวัสดุเม็ดลูกดินสำหรับวัสดุปลูกพืชและปุ๋ยละลายช้า

วัสดุเม็ดลูกดินพัฒนาขึ้นจากวัตถุดิบและวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่น ได้แก่ ดินขาว ไตอะทอไมท์ และซี เลีย สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกพืชและการทำหน้าที่เป็นเม็ดปุ๋ยละลายช้า จากผลการศึกษา รูปแบบและสูตรการผลิตที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี ทางกล และการ ประเมินค่าใช้จ่ายในเบื้องต้นของเม็ดลูกดินที่ผลิต สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) วัสดุเม็ดลูกดินที่ผลิตขึ้นส่วนผสมจากวัตถุดิบทั้งสามชนิด (ดินขาว ไตอะทอไมท์ และซี เลีย) สามารถพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกได้ และในการผลิตไม่จำเป็นต้องเติม สารผสม (binder) เพื่อขึ้นรูปภายใต้สภาวะการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C (อุณหภูมิ การเผาช่วงต่ำ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความพรุนตัวสูงและดูดซึมน้ำได้ดี) รูปแบบที่ เหมาะสมสำหรับการผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปัจจุบัน คือ รูปแบบท่อนลูกบาศก์ ซึ่งสามารถ ผลิตได้ในคราวละปริมาณมาก เนื่องจากขึ้นรูปได้ง่ายโดยใช้เครื่องรีดและการตัด สำหรับ ค่าใช้จ่ายจากการประมาณการเบื้องต้น (วัตถุดิบ การเสื่อมราคา ค่าไฟ และค่าแรง) ใน การผลิตเม็ดลูกดินชนิดท่อนลูกบาศก์อยู่ที่ประมาณ 0.4-0.5 บาท/กิโลกรัม ขณะที่รูปแบบ เม็ดลูกดินทรงกลม ณ ปัจจุบันยังคงขึ้นรูปโดยการปั้นด้วยมือ

- 2) สูตรผสมของวัตถุดิบที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ (จากการศึกษาสูตรสามเหลี่ยมทั้งหมดจำนวน 15 สูตร) มีจำนวน 2 สูตร ได้แก่ สูตรผสม ดินขาว: ไดอะทอมไมท์: ขี้เลื่อย เท่ากับ 25:60:15 (สูตร 3) และ 40:45:15 (สูตร 6) นอกจากนี้พบว่าสูตรผสมที่มีปริมาณขี้เลื่อยสูงกว่าร้อยละ 30 จะส่งผลให้เนื้อดินมีลักษณะแตกหักและยุบสลายภายหลังการเผาเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ปริมาณขี้เลื่อยที่สูงกว่าร้อยละ 15 พบว่าค่าความแข็งของเม็ดลูกดินลดลงจากเดิมถึงร้อยละ 43-66 ดังนั้นสูตรผสมจึงมีผลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเม็ดลูกดิน
- 3) วัสดุเม็ดลูกดินท่อนลูกบาศก์ที่ผลิตขึ้นจากสูตร 3 และสูตร 6 ทั้งสองขนาดคือ 0.5x0.5x0.5 cm และ 1x1x1 cm มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกตามเกณฑ์ที่กำหนด (ตารางที่ 3.2) ดังนี้ คือ มีค่า pH เป็นกลาง (pH 7.1±0.19-7.7±0.13) ค่าความจุหรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CE.C) ต่ำ-ปานกลาง (13.17±0.09-17.27±0.01 cmol(e)/kg) ค่าความหนาแน่นต่ำ (1.5±0.71-1.6±0.35 g/cm³) มีน้ำหนักเบา อุ่มน้ำหรือดูดซึมน้ำได้ดี (63±2.56%-73±1.23%) ไม่ยุบตัวในน้ำ (0.05±0.06%) และมีความแข็งหรือความคงตัวสูง (11,296±21.10 kg/cm²-13,275±65.98 kg/cm²) จึงเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติกับ Perlite (วัสดุปลูกที่จำหน่ายในท้องตลาด) พบว่า Perlite มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำมาก (0.07±0.14 g/cm³) จึงมีน้ำหนักเบาและอุ่มน้ำได้ดีกว่าวัสดุผสมที่พัฒนาขึ้น แต่เนื่องจากค่าการดูดซึมน้ำของ Perlite ค่อนข้างสูง (231±0.71%) จึงสามารถสลายตัวและยุบตัวในน้ำได้ง่ายจึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
- 4) วัสดุเม็ดลูกดินสูตร 3 และสูตร 6 มีองค์ประกอบเชิงปริมาณทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณองค์ประกอบหลักที่พบ ได้แก่ ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และ สนิมเหล็ก (Fe₂O₃) โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 72.379-73.716, 12.708-13.529, และ 7.223-9.561 และผลทดสอบการชะโลหะหนักบ่งชี้ว่าเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น (สูตร 3 และ สูตร 6) สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปลูกได้อย่างปลอดภัยและไม่ส่งผลเป็นพิษต่อพืช นอกจากนี้ วัสดุเม็ดลูกดินสูตร 3 มีความพรุนตัวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าสูตร 6 จึงส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.70) มีค่าต่ำกว่าเม็ดลูกดินสูตร 6 (2.03) และพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการวิเคราะห์สัณฐานของเม็ดลูกดิน โดย Scanning Electron Microscopy
- 5) วัสดุเม็ดลูกดินทั้งสองสูตรและทั้งสองขนาด ที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 มีค่า TN เพิ่มขึ้นจากเดิม (0.06-0.07%) ประมาณ 36-43 เท่า คืออยู่ในช่วงร้อยละ 2.57-2.79 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกัน พบว่าการผึ่งแห้งตามปกติหรือการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (TN=1.78-2.00%) ส่งผลให้ค่า TN มีค่าต่ำกว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 75±5°C (TN=2.17-2.45%) อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ถึงร้อยละ 16-22 ในทุกเงื่อนไขที่ทดสอบ อย่างไรก็ตามผลการศึกษพบว่าวิธีการทำให้แห้งที่แตกต่างกันไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ($P>0.05$) ต่อความแตกต่างของค่า

NO_3^- -N ในเม็ดลูกดิน แต่การทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^\circ\text{C}$ มีผลให้ค่าความชื้นของเม็ดลูกดินทั้งสองสูตร (สูตร 3 และ 6) ต่ำกว่าการปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ถึงร้อยละ 10-18

5.1.2 การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการชะล้าง

การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการชะล้างด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) และสารละลายดินสังเคราะห์ (Synthesis soil solution) โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ภายใต้เงื่อนไขการเตรียมเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6) ทั้งสองขนาด (พอลูกบาศก์ ขนาด $0.5\times 0.5\times 0.5$ cm และ $1\times 1\times 1$ cm) คือ 1) การทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 2) การทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75\pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการศึกษเปรียบเทียบกับ Osmocote และ ปุ๋ยยูเรีย สรุปได้ดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่า pH เริ่มต้นของน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ 7.05 และ 6.62 เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะที่เกิดขึ้น ระหว่างเม็ดลูกดิน Osmocote และปุ๋ยยูเรีย พบว่าค่า pH ในน้ำชะของปุ๋ยยูเรียจะมีค่าค่อนข้างเป็นด่าง (pH 8-9) ในช่วงแรก (24 ชั่วโมง) หลังจากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองของเม็ดลูกดิน สำหรับกรณีของชุดการทดลองเม็ดลูกดิน พบว่าค่า pH โดยส่วนใหญ่มีค่าค่อนข้างเป็นกรดเล็กน้อยถึงกลาง (pH 4.5-7.7) ตลอดการทดสอบ ขณะที่ค่า pH ในน้ำชะของ Osmocote ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการทดสอบพบว่ามีค่าค่อนข้างเป็นกรด (pH 4-5) หลังจากนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่นานขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่สิ้นสุดการทดลอง (720 ชั่วโมงหรือ 1 เดือน) ค่า pH ในน้ำชะของเม็ดลูกดินในทุกชุดการทดลองยังคงมีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช คือ 5.42-6.73 สำหรับ Osmocote และปุ๋ยยูเรียอยู่ในช่วง 5.53-5.79 และ 5.25-5.98 ตามลำดับ สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในน้ำชะอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สูตรผสมเม็ดลูกดินและชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง

2) การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า (EC)

ค่า EC เริ่มต้นของน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์มีค่าเท่ากับ $4.98\ \mu\text{S}/\text{cm}$ และ $2.54\ \text{mS}/\text{cm}$ เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะที่เกิดขึ้น ระหว่างเม็ดลูกดิน Osmocote และปุ๋ยยูเรีย พบว่าทุกกรณีมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะที่เหมือนกัน คือ ค่า EC จะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่นานขึ้น อย่างไรก็ตาม เฉพาะเงื่อนไขของ Osmocote พบว่าค่า EC ในน้ำชะมีค่าค่อนข้างสูงมากในช่วงแรก-กลาง ($1-14\ \text{mS}/\text{cm}$) และแตกต่างจากชุดการทดลองของเม็ดลูกดินและปุ๋ยยูเรียอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) ซึ่งเป็นผลเนื่องจากสารเคลือบเม็ดปุ๋ย (เรซิน) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า EC ในน้ำชะของชุดการทดลองปุ๋ยยูเรียและเม็ดลูกดินทั้งสภาวะการชะด้วยน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์เป็นระดับค่าการนำไฟฟ้า (ค่าความเข้มข้นของเกลือทั้งหมดที่ละลายน้ำ) ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบ (non-saline $<400\ \mu\text{S}/\text{cm}$, $0.4\ \text{mS}/\text{cm}$) ถึงส่งผลต่อพืชน้อยมาก (very slightly saline $400-800\ \mu\text{S}/\text{cm}$) ดังนั้น วัสดุเม็ดลูกดินที่ถูกพัฒนาขึ้นจากแร่ดินเบาและไดอะทอมไมต์ซึ่งมีสมบัติเฉื่อยทางเคมีและค่าการนำ

ไฟฟ้าและความร้อนค่อนข้างต่ำ และผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียทั้งสองสูตร (สูตร 3 และสูตร 6) จึงมีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุปลูกพืชแทนดิน ขณะเดียวกัน ภายใต้สภาวะการชะเม็ดลูกดินด้วยน้ำกลั่นหรือสารละลายดินสังเคราะห์ ได้ส่งผลน้อยมากถึงระดับไม่ส่งผลต่อการใช้ธาตุอาหารและด้านความเป็นพิษต่อพืช จากผลกระทบของปริมาณเกลือที่ละลายออกมา สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า EC ในน้ำชะอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สูตรผสมและขนาดของเม็ดลูกดิน รวมทั้งชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง

3) การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN)

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่า TN ในน้ำชะที่เกิดขึ้น ระหว่างชุดการทดลองเม็ดลูกดินและ Osmocote พบว่ากรณีการชะในทุกชุดการทดลองของเม็ดลูกดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการทดสอบ โดยร้อยละสะสมของค่า TN ที่ถูกชะออกมาเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ $64.60 \pm 7.307 - 83.68 \pm 7.112$ ของค่าเริ่มต้น ขณะที่ค่า TN ในน้ำชะของ Osmocote ในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการทดสอบพบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำมาก (0.10-0.20%) เมื่อเทียบกับค่าปริมาณ TN เริ่มต้น ($N \approx 13\%$) นอกจากนี้การปลดปล่อยหรือการชะธาตุอาหาร (TN) ในชุดการทดลองของ Osmocote ยังคงปลดปล่อยปริมาณ TN ได้อย่างสม่ำเสมอโดยมีค่า TN อยู่ในช่วงประมาณ 60-500 mg/kg ทั้งภายใต้เงื่อนไขการชะด้วยน้ำกลั่นและสารละลายดินสังเคราะห์ตลอดระยะเวลา 1 เดือน ในการประยุกต์ใช้วัสดุเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยสารละลายยูเรียเข้มข้น 10% (modified with urea) เป็นตัวกลางสำหรับการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow release) ของยุโรปและมาตรฐานปุ๋ยควบคุมปลดปล่อย (controlled release) ของอเมริกาและญี่ปุ่นที่กำหนดให้ร้อยละสะสมการปลดปล่อย N ต้องไม่เกินร้อยละ 15 และ 40 ที่ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการชะค่า TN ออกจากวัสดุเม็ดลูกดินยังคงช้ากว่าปุ๋ยยูเรียซึ่งละลายน้ำได้เกือบร้อยละ 100 สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TN ในน้ำชะอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สูตรผสม ขนาดของเม็ดลูกดิน ชนิดสารที่ใช้ในการชะล้าง และอุณหภูมิในการทำแห้ง

5.1.3 การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินภายใต้สภาวะการบ่มดิน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เคมี และพลวัตรของธาตุอาหาร (N) ของดินทดสอบ ภายใต้การทดสอบวัสดุเม็ดลูกดินที่สภาวะการบ่มดิน (soil incubation) ในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ โดยศึกษาเปรียบเทียบเม็ดลูกดิน (สูตร 3 และสูตร 6) ทั้งสองขนาด (ท่อนลูกบาศก์ ขนาด $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ cm และ $1 \times 1 \times 1$ cm) ที่เงื่อนไขการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ $75 \pm 5^\circ\text{C}$ และทำการศึกษาเปรียบเทียบกับปุ๋ยยูเรีย สรุปผลได้ดังนี้

1) สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินทดลอง

ดินที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้เป็นชุดดินสนทราย มีลักษณะเนื้อดินเป็นดินปนทราย จัดเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ (OM 2.24%) โดยมีปริมาณอนุภาคทรายแบ่งและดินเหนียวรวมกันสูงถึงประมาณร้อยละ 75.8 ดินมีสีน้ำตาลปนเทา มีค่าปฏิกิริยาดินเป็นกรดปานกลาง (pH 5.36) ไม่มีปัญหาความเค็ม ($\text{EC} < 400 \mu\text{S/cm}$) และมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุปานกลาง ($\text{CEC } 22.69 \text{ cmol(e)/kg}$)

2) การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของดิน

ในขั้นตอนก่อนการทดลองโดยการเตรียมดินและปรับความชื้นให้เหมาะสม พบว่าดินมีค่าความชื้นประมาณร้อยละ 13-14 ภายหลังการผสมเม็ดลูกดินมีผลให้ค่าความชื้นในดินลดลงประมาณร้อยละ 4-5 เนื่องจากการดูดซับความชื้นโดยเม็ดลูกดิน ตลอดช่วงการศึกษาพบว่าทุกชุดการทดลองของเม็ดลูกดิน ยกเว้นชุดการทดลองควบคุม สามารถปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียและส่งเสริมให้เกิดกระบวนการ mineralization อย่างต่อเนื่อง จึงสามารถสมดุลความชื้นได้ดีกว่าชุดการทดลองควบคุมและค่าความชื้นในสัปดาห์ที่ 2-4 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ชุดการทดลองควบคุม (control) สูญเสียความชื้นสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่ายกว่าชุดการทดลองอื่น สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในดินอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สูตรผสมของเม็ดลูกดิน

3) การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของดิน

ในทุกชุดการทดลองยกเว้นชุดการทดลองควบคุม พบการเพิ่มขึ้นของค่า pH (pH 8-9) อย่างรวดเร็วภายในสัปดาห์ที่ 1 ของการทดลอง และค่อนข้างคงที่ในช่วง $8.33 \pm 0.01 - 8.69 \pm 0.03$ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง (1 เดือน) กล่าวได้ว่ากระบวนการ mineralization ของปุ๋ยยูเรียยังคงดำเนินอยู่อย่างต่อเนื่อง จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติไม่พบปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างของค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม ค่า pH ของการศึกษานี้ยังมีค่าค่อนข้างเป็นด่าง ซึ่งค่า pH ของดินที่เหมาะสมต่อกิจกรรมการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดินและการเพาะปลูกควรอยู่ในช่วง 6.5-7.8 ดังนั้นอาจต้องใช้ระยะเวลาสำหรับกระบวนการ mineralization นานขึ้นเพื่อปรับเสถียรค่า pH ให้ลดต่ำลง

4) การเปลี่ยนแปลงค่าแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)

ในทุกชุดการทดลองของเม็ดลูกดินยกเว้นชุดการทดลองควบคุม (Control) เกิดกระบวนการ Mineralization ของปุ๋ยยูเรียที่ย่อยสลายเป็น $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ และ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ตามลำดับ จึงมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ และค่า pH อย่างรวดเร็ว การลดลงของค่า $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ตามระยะเวลาการบ่มดินที่นานขึ้นในทุกชุดการทดลอง อาจเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของก๊าซ $\text{NH}_3^+ - \text{N}$ โดยกระบวนการ volatilization ภายใต้อิทธิพลของความชื้นที่ค่อนข้างต่ำ (10-15%) และการออกซิเดชันอ็อกไซด์ $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ บางส่วนกลายเป็น $\text{NO}_2^- - \text{N}$ และ $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าการเตรียมวัสดุเม็ดลูกดินด้วยสารละลายยูเรียที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 สามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ โดยไม่ส่งผลเป็นพิษต่อพืช ทั้งยังสามารถใช้เป็นแหล่งธาตุไนโตรเจนและปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนให้แก่ดินได้อย่างเพียงพอ ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 200-400 mg/kg)

5) การเปลี่ยนแปลงค่าไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)

ตลอดระยะเวลาการบ่มดินนาน 1 เดือน พบว่าค่าความเข้มข้นของ $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ในทุกชุดการทดลอง (Exp-1 ถึง Exp-6) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าค่อนข้างต่ำ (< 10 mg/kg) และแปรปรวนอยู่ในช่วง 1.5-2.4 mg/kg ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากความชื้นในดินค่อนข้างต่ำ (9-15%) จึงจำกัดให้กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ค่อนข้างช้า (อัตรากระบวนการ mineralization ค่อนข้างต่ำ) ดังนั้นในการประยุกต์ใช้เม็ดลูกดินเพื่อทำหน้าที่ปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่ดิน ข้อคำนึงที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การปรับค่าความชื้นของดิน เนื่องจากความชื้นที่ใช้ปรับบางส่วนนั้นจะถูกดูดซับไว้ในวัสดุเม็ดลูกดิน ทำให้

ค่าความชื้นของดินลดต่ำกว่าระดับที่ต้องการ จึงควรมีการทดสอบหาช่วงความชื้นใช้งานที่เหมาะสม ก่อนนำไปประยุกต์ใช้จริง

6) การเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดิน

เนื่องจากการใช้ยูเรียเป็นแหล่งธาตุอาหารในการศึกษา ดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดินอย่างมีนัยสำคัญ (สัปดาห์ที่ 1-4) ค่าอินทรีย์วัตถุในดินจึงค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับค่าอินทรีย์วัตถุของดินที่ใช้ทดลอง (2.24%)

7) การเปลี่ยนแปลงค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TN) ของเม็ดลูกดิน

การลดลงของค่า TN ในเม็ดลูกดินทุกชุดการทดลองบ่งชี้ว่าเกิดการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากวัสดุเม็ดลูกดินสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งสอดคล้องกับผลการเพิ่มขึ้นของค่า $\text{NH}_3\text{-N}$ ในดิน เม็ดลูกดินค่อยๆ ปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียอย่างต่อเนื่องภายหลังสัปดาห์ที่ 1 เป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทดลอง (สัปดาห์ที่ 2-4) ดังการเปลี่ยนแปลงค่า TN ของเม็ดลูกดินในทุกชุดการทดลองพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ปริมาณ TN ในเม็ดลูกดินที่สิ้นสุดการทดลอง ยังคงมีค่าเหลืออยู่ประมาณ 1,100-1,670 mg/kg ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองควบคุม 5.5-8.4 เท่า ดังนั้นผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า วัสดุเม็ดลูกดินที่ผ่านการเตรียมด้วยปุ๋ยยูเรียสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการปลดปล่อยธาตุอาหารแบบค่อยเป็นค่อยไปได้ในระดับหนึ่งโดยเฉพาะในช่วงสัปดาห์ที่ 2 ของการปลูกเป็นต้นไป สำหรับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TN ในเม็ดลูกดินอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ขนาดของเม็ดลูกดิน

5.2 ข้อเสนอแนะของการวิจัย

5.2.1 การพัฒนาผลิตภัณฑ์

- 1) ควรศึกษาศักยภาพวัสดุเม็ดลูกดินทรงกลมเพิ่มเติม พร้อมกับการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปและการผลิตเม็ดลูกดินทรงกลมแทนการปั้นด้วยมือ
- 2) ควรศึกษาปุ๋ยชนิดอื่นเพิ่มเติมที่เปลี่ยนรูปได้ช้ากว่ายูเรียเพื่อประยุกต์ใช้กับวัสดุเม็ดลูกดิน
- 3) พัฒนาประสิทธิภาพการปลดปล่อยธาตุอาหารโดยเทคนิคการเคลือบด้วยวัสดุธรรมชาติ ที่มีราคาต่ำ เป็นต้น

5.2.2 การนำไปใช้

- 1) ถึงแม้ว่าสูตรผสมเม็ดลูกดินที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้มีจำนวนสองสูตร คือ สูตร 3 และ สูตร 6 อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในแง่การผลิตและนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ คณะผู้วิจัยแนะนำสูตรผสม ดินขาว: ไตอะทอไมท์: ซีลี้อย 25:60:15 (สูตร 3) เป็นสูตรการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากวัสดุเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้นจากสูตร 3 มีสมบัติความพรุนตัว พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนสูงกว่าสูตร 6 ซึ่งสมบัติทางกายภาพเหล่านี้ ส่งผลต่อกระบวนการชะและการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนในดินของปุ๋ยยูเรียที่อยู่ในวัสดุเม็ดลูกดิน นอกจากนี้ ในการผลิตเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณมากย่อมส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนการผลิตและการขนส่งของวัสดุเม็ดลูกดินสูตร 3 มีค่าต่ำกว่าเม็ดลูกดินสูตร 6 เนื่องจากเม็ดลูกดินสูตร 3 มีค่าค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดลูกดินสูตร 6 ดังนั้น มวลที่เบากว่าจึงช่วยประหยัดค่าขนส่งได้
- 2) วัสดุเม็ดลูกดินที่พัฒนาขึ้น ถือว่ามีคุณสมบัติพร้อมใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นวัสดุปลูกพืชและสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการปลดปล่อยธาตุอาหารแบบค่อยเป็นค่อยไปได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาทดลองขั้นการนำไปใช้จริง โดยการทดสอบการปลูกพืชระดับไม่กระถาง เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] IPCC (2007b). Climate Change (2007): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Working Group II Contribution to the intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report.
- [2] ไชยวัฒน์ ศุภเสวตสรรค์ (2553) ความรู้และข้อควรระวังเกี่ยวกับการใช้ปุ๋ย . www.ldd.go.th
- [3] Banjarata Jolanun and Sirintornthep Towprayoon (2010). "Novel bulking agent from clay residue for food waste composting " Bioresource Technology, Vol.101, No.12, pp.4484-4490.
- [4] บัญจรัตน์ โจลานันท์ และ สิริรินทร์เทพ เต้าประยูร (2553) การประยุกต์ใช้วัสดุเม็ดชนิดใหม่เป็น บัลกิ้งเอเจนท์สำหรับการหมักปุ๋ยอินทรีย์: พฤติกรรมจุลินทรีย์และคุณภาพปุ๋ยหมัก. รายงานวิจัย ฉบับสมบูรณ์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- [5] วัชรระ ยาวีไชย (2550) การผลิตเซรามิกซิลิเกตรูพรุนสูงสำหรับวัสดุปลูกพืช วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [6] กรรณิกา เตชะสกุลมาศ (2528) สมบัติทางเคมีของดินเหนียวและดินขาวบางตัวอย่าง การค้นคว้าแบบอิสระเชิงวิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาการสอนเคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [7] สมชาย พุ่มอิม (2524) การเปรียบเทียบลักษณะการเกิดและแร่ประกอบของดินขาวบางแหล่งในภาคเหนือของประเทศไทย วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาธรณีวิทยา) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [8] Kaolin Clay: Functional Optical Additives. Online: <http://www.rtvanderbilt.com> [Retrieved January 2012]
- [9] Kaolinite crystals. Online: <http://www.sciencelearn.org.nz> [Retrieved January 2012]
- [10] White Clay. Online: www.cermas.com [Retrieved March 2011]
- [11] พลยุทธ์ สุขสมิตติ (2539) ดินขาวและดินเหนียวดำ สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 3 เชียงใหม่
- [12] นงพาง จิตกร: ดินเบา. Online www.tistr.or.th [Retrieved March 2011]
- [13] เชิดศักดิ์ อรรถอรุณ (2544) การสำรวจและวิจัยดินเบาลำปางเพื่องานด้านสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี

- [14] Diatomite. Online: www.thenaturelabs.com. [Retrieved March 2011]
- [15] ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soiless Culture). Online: www.eto.ku.ac.th [Retrieved January 2011]
- [16] Hydroponics. Online: <http://hydroponicssystems.co> [Retrieved May 2011]
- [17] Aeroponics. Online: <http://www.hydroponicsequipment.co> [Retrieved May 2011]
- [18] Vermiculite. Online: <http://www.hydroponics-gardens.com> [Retrieved May 2011]
- [19] อิทธิสุนทร นันทกิจ. การปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate culture). Online: www.kmitl.ac.th [Retrieved January 2011]
- [20] Aeroponics. Online. www.steadygrowpro.com [Retrieved May 2011]
- [21] ยงยุทธ โอสดสภา อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ธงประยูร (2551) ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
- [22] Cox W.J. and Robson A.D. Co-optimization of plant nutrition-improving the efficiency of fertilizer use. Online. www.regional.org.au [Retrieved May 2011]
- [23] Sulphur Coated Urea Online. www.tradenote.net [Retrieved October 2011]
- [24] ศรีประไพ เปลียนอนุกุล (2524) ผลของปุ๋ยละลายช้าและยาฆ่าแมลงชนิดเม็ดที่มีต่อการผลิตดาวเรืองกระถาง วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [25] Escobar F.R., M. Benlloch, E. Herrera, and J.M. Garcia-Novelo (2004) "Effect of traditional and slow release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching" Scientia Horticulture, 2004, Vol. 101, pp.39-49.
- [26] Khan M.A., Mingzhi W., Lim Bu-Kug, and Lee Jong-Yoon (2008) "Utilization of waste paper for an environmentally friendly slow-release fertilizer". Journal of Wood Sci. 54; 158-161.
- [27] Khan M.A., Mingzhi W., Lim Bu-Kug, and Lee Jong-Yoon (2008) "Nutrient-impregnated charcoal: an environmental friendly slow release fertilizer". Environmentalist. 28; 231-235.
- [28] Pickering W.H., N.W. Menzies, and M.N. Huter (2002). "Zeolite/rock phosphate-a novel slow release phosphorus fertilizer for potted plant production". Scientia Horticulture, Vol. 94, pp.333-343.

- [29] Prasitthichokekul K., S. Wangkarn, S. Thiansem, P. Sooksamiti, and O. Arquero (2005). "Production of fired ceramic planting materials from power plant wastes" Proceedings, 31 st Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 18-20 October 2005.
- [30] Wu L., M. Liu, and R. Liang (2008). "Preparation and properties of double-coated slow release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water retention" Bioresource Technology, Vol.99, pp. 547-554.
- [31] Wu L. and M. Liu (2008). "Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water retention" Carbohydrate Polymers, Vol.72, pp. 240-247.
- [32] ณัฐวุฒิ จุลสงค์ (2549) ศึกษาอัตราการใช้น้ำหมักชีวภาพ (ซูเปอร์ พด.2) เพื่อการปลูกหน้าวัวทางภาคใต้ตอนบน รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ กรมพัฒนาที่ดิน
- [33] ตรัง เป็กทอง (2546) การออกแบบโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อการพัฒนาไส้กรองเซรามิกจากไดอะทอมไมต์แหล่งลำปาง วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม เซรามิก) มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
- [34] ทิวาสวัสดิ์ ศิริโสม (2552) ผลของการตัดแปรรูปไดอะทอมไมต์ต่อความสามารถดูดซับโลหะหนัก วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [35] ธนา สมบัติทัฬห (2548) การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยพืชสด 5 ชนิดในดินที่มีเนื้อดิน ความเป็นกรดต่าง และระดับความชื้นที่แตกต่างกัน วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [36] นิศารัตน์ ทวีนุต (2546) ประสิทธิภาพของเชื้อจุลินทรีย์ดินต่อการย่อยสลายฟอสเฟตและการตรึงไนโตรเจนในปุ๋ยหมัก วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [37] สิทธิชัย ลอดแก้ว (2543) ผลกระทบของปุ๋ยเคมี จุลธาตุ และปูนต่อผลผลิตและคุณภาพของข้าวบาร์เลย์บนชุดดินปานและดินที่สูงสะเมิง วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [38] Harpstead M.I., T.J. Sauer, and W.F. Bennett (2001). Soil science simplified 4th ed. Iowa State University Press. USA.
- [39] Soil and Plant Analysis Council (2000). Soil analysis: Handbook of reference methods. CRC Press LLC. USA.

- [40] Vlassak K. (1970). Total soil nitrogen and nitrogen mineralization. *Plant and Soil*. 32: 27-32.
- [41] Spectrum Analytic Inc. Understanding CEC, Buffer soil pH, Percent Saturation. Online: <http://www.spectrumanalytic.com/support/library/> [Retrieved June 2012]
- [42] เรวัตร จินดาเจีย (2546) ศึกษาวัสดุปลูกที่เหมาะสมสำหรับการปลูกมะเขือเทศเชอร์รี่ โดยไม่ใช้ดินในเขตร้อน วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [43] Gandhi A.P and Paliwal K.V (1976). Mineralization and gaseous losses of nitrogen from urea and ammonium sulphate in salt-affected soils. *Plant and Soil*, 45: 247-255.
- [44] Cabrera R.L (1997). Comparative evaluation of nitrogen release patterns from controlled-release fertilizers by nitrogen leaching analysis. *HortScience*, 32(4): 669-673.
- [45] โยธิน อนาสิทธิ์ (2534) ผลของสารละลายซูโครสและความชื้นของดินที่มีต่อประสิทธิภาพการให้ปุ๋ยยูเรียทางใบของถั่วเหลือง วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [46] ค่าคุณสมบัติทางเคมี กลุ่มชุดดินที่ 22 Online. www.doae.go.th [Retrieved December 2011]
- [47] หาญ แสงโชติ (2551) ผลการย่อยสลายของซากใบไม้พันธุ์ไม้ป่าและไม้ผลที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [48] Tiquia S.M., Tam N.F.Y. and Hodgkiss I.J. (1998). Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. *Agriculture Ecosystems & Environment*. (67): 79-89.
- [49] Schenk M. and Wehrmann J. (1979). The influence of ammonia in nutrient solution on growth and metabolism of cucumber plants. *Plant and Soil*, (52): 403-414.
- [50] E.S. Marx, J. Hart, and R.G. Stevens. Soil test interpretation guide. Online. <http://ir.library.oregonstate.edu> [Retrieved March 2012]
- [51] HE Xu-sheng, Liao Zong-wen, Huang Pei-zhoa, Duan Ji-xian, GE Ren-shan, Li Hong-bo and Geng Zeng-choa. (2007). Characteristics and performance of novel water absorbent slow release nitrogen fertilizers. *Agricultural Sciences in China*. 6 (3): 338-346.

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 13(3) ข้อ 13(3)(ก) และข้อ 13(3)(ข) แห่งกฎกระทรวง ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่มีสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติตามที่กำหนดในภาคผนวกที่ 1 ท้ายประกาศนี้ ต้องดำเนินการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามที่กำหนดในข้อ 2 และ ข้อ 3

ข้อ 2 ห้ามมิให้นำสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามข้อ 1 ออกนอกบริเวณโรงงาน เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม หรือผู้ซึ่งอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรมมอบหมายให้นำออกไปเพื่อการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้งหรือฝังด้วยวิธีการและสถานที่ ตามหลักเกณฑ์และวิธีการที่กำหนดในภาคผนวก ที่ 2 ท้ายประกาศนี้

ข้อ 3 ต้องแจ้งรายละเอียดเกี่ยวกับชนิด ปริมาณ ลักษณะ คุณสมบัติและสถานที่เก็บสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ๆ พร้อมทั้งวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง ฝัง เคลื่อนย้าย และการขนส่ง ตามแบบ ร.ง.6 ท้ายประกาศนี้ต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรมภายในกำหนด 90 วันนับแต่ประกาศนี้มีผลใช้บังคับ ยกเว้นผู้ประกอบกิจการโรงงานซึ่งประกอบกิจการโรงงานภายหลังจากประกาศนี้มีผลใช้บังคับ ให้แจ้งภายในกำหนด 90 วันนับแต่วันที่เริ่มประกอบกิจการโรงงาน ต้องแจ้งรายละเอียดตามวรรคหนึ่งครั้งต่อไปทุกปีภายในวันที่ 30 ธันวาคม และการแจ้งให้สามารถส่งทางไปรษณีย์ลงทะเบียนตอบรับได้ โดยให้ถือว่าวันที่พนักงานไปรษณีย์ได้ส่งเป็นวันที่แจ้ง ทั้งนี้ ตั้งแต่วันถัดจากวันที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเป็นต้นไป

ประกาศ ณ วันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2540

(นายกร ทัพพะรังสี)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศลงในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 114 ตอนพิเศษ 106ง วันที่ 13 พฤศจิกายน 2540

ภาคผนวกที่ 1
บัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว
ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

หมวด 1

สิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วประเภทสารไวไฟ (Ignitable substances) สารกัดกร่อน (Corrosive substances) สารที่
เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactive substances) สารพิษ (Toxic substances) และ
สารที่ถูกระคายได้ (Leachable substances)

.....

.....

ข้อ 5 สารที่ถูกระคายได้ (Leachable substances) เป็นสารซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในข้อ 3 ของภาคผนวกที่ 2 ท้ายประกาศนี้แล้ว มีปริมาณโลหะหนักหรือวัตถุมีพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์ซีนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Barium)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เบนซีน (Benzene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	6.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ออร์โธ-ครีซอล (ortho-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทา-ครีซอล (meta-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
พารา-ครีซอล (para-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ครีซอล (ทั้งหมด) (Cresol (total))	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2-4 ดี (2-4 D)	10.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,4-ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	7.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,1-ไดคลอโรเอทิลีน (1,1-Dichloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
เอนด์ริน (Endrin)	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลอร์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรบิวตาไดอิน (Hexachlorobutadiene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรอีเทน (Hexachloroethane)	3.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ลินเดน (Lindane)	0.4	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมธอกซีคลอร์ (Methoxychlor)	10.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ไนโตรโทลูอิน (2,4-Nitrotoluene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไพริดีน (Pyridine)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน (Silver)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาเฟน (Toxaphene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	400.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenol)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5-ทีพี (ซิลเว็กซ์) (2,4,5-TP (Silvex))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไวนิล คลอไรด์ (Vinyl chloride)	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาคผนวกที่ 2

หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)

ข้อ 1 การทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามที่กำหนดในภาคผนวกที่ 1 ให้ผู้ประกอบการกิจการโรงงานดำเนินการโดยวิธีการบำบัด (Treatment) หรือการกำจัด (Disposal) วิธีการใดวิธีการหนึ่ง หรือหลายวิธีต่อเนื่องกัน (Chain treatments) ขึ้นกับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ๆ ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรมหรือผู้ซึ่งอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรมมอบหมาย ดังต่อไปนี้

1.1 การบำบัดโดยวิธีฟิสิกส์ (Physical treatment) ได้แก่

- 1.1.1 การเหวี่ยงแยก (Centrifugation)
- 1.1.2 การกลั่นแยกด้วยไอน้ำ (Steam distillation and Steam stripping)
- 1.1.3 การกรองผ่านตัวกรองหลายชั้น (Multi-media filtration)
- 1.1.4 การกรอง แยกด้วยเยื่อเมมเบรน (Reverse osmosis, Micro-/Ultra-filtration)
- 1.1.5 การทำระเหย (Evaporation)
- 1.1.6 การแยกด้วยฟองอากาศ (Air flotation)
- 1.1.7 การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity thickening)
- 1.1.8 การแยกด้วยเครื่องแยกน้ำและน้ำมัน (Oil/water separator or Coalescence separator)

1.2 การบำบัดโดยวิธีเคมี-ฟิสิกส์ (Physical/chemical treatment) ได้แก่

- 1.2.1 การชะล้างดิน (Soil washing)
- 1.2.2 การแยกด้วยอากาศ (Air stripping)
- 1.2.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption)
- 1.2.4 การจับตัวตกตะกอน (Precipitation/Flocculation)
- 1.2.5 การแยกด้วยอากาศละลายน้ำและสารเคมี (Dissolved air flotation)
- 1.2.6 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)
- 1.2.7 การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid/liquid extraction)
- 1.2.8 การกรองรีดน้ำ (Filter press, dewatering, vacuum filtration and belt-press filtration)

1.3 การบำบัดโดยวิธีเคมี (Chemical treatment) ได้แก่

- 1.3.1 การปรับค่าความเป็นกรดด่างและทำให้เป็นกลาง (Neutralization and pH adjustment)
- 1.3.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน (Oxidation/reduction reactions)
- 1.3.3 การทำลายความเป็นพิษด้วยก๊าซโอโซน หรือรังสีเหนือม่วง (Ozonation and UV/ozonation)
- 1.3.4 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)

- 1.3.5 การตกตะกอน (Precipitation)
- 1.3.6 การทำลายคลอรีนอิสระ (Dechlorination)
- 1.3.7 การทำลายสารประกอบฮาโลเจน (Dehalogenation)
- 1.4 การบำบัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological treatment) ได้แก่
 - 1.4.1 ตั้งปฏิกรณ์ฟิล์มตรึง (Attached film reactors)
 - 1.4.2 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)
 - 1.4.3 ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)
 - 1.4.4 การหมัก (Composting)
 - 1.4.5 ระบบบ่อฝัง (Stabilization ponds)
 - 1.4.6 การย่อยสลายทางชีวภาพแบบอยู่กับที่ (In situ biological decomposition)
 - 1.4.7 การทำลายพิษทางชีวภาพ (Biological detoxification)
- 1.5 การบำบัด หรือการกำจัดโดยกระบวนการใช้ความร้อน (Thermal processes for treatment and/or disposal) ได้แก่
 - 1.5.1 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Wet-air oxidation)
 - 1.5.2 การฉีดเผาในรูปของเหลว (Liquid injection incineration)
 - 1.5.3 การเผาในเตาเผาซีเมนต์ และการเผาในเตาหมุน (Cement kiln incineration and Rotary kiln incineration)
 - 1.5.4 การเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed incineration)
 - 1.5.5 การทำระเหยด้วยแสงแดด (Solar evaporation)
- 1.6 การบำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียร กระบวนการตรึงสาร กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Stabilization/fixation/solidification processes) ได้แก่
 - 1.6.1 การหล่อหุ้มในแก้วหลอม (Molten glass)
 - 1.6.2 การตรึงด้วยสารเคมี (Chemical fixation)
 - 1.6.3 การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยสารประสาน (Pozzolan and cement based solidification)
 - 1.6.4 การหล่อหุ้มด้วยสารเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic encapsulation)
 - 1.6.5 การทำเป็นโพลิเมอร์ (Polymer encapsulation)
- 1.7 การบำบัด หรือการกำจัดแบบ land treatment and/or disposal ได้แก่
 - 1.7.1 การทำลายฤทธิ์ในหน้าดิน (Land farming)
 - 1.7.2 การพ่นรดน้ำ (Spray irrigation)
 - 1.7.3 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Engineered, secured landfill)

1.7.4 การเก็บบนพื้นดินระยะยาว (Above ground long-term storage)

1.7.5 การฉีดลงชั้นน้ำใต้ดินลึก (Deepwell injection)

1.8 ผู้ประกอบกิจการโรงงานสามารถใช้วิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทั้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยวิธีการอื่น ๆ ที่ต่างไปจากที่กำหนดไว้ในข้อ 1.1 ถึงข้อ 1.7 หรือใช้วิธีการอื่น ๆ ที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าได้ผลเทียบเท่า หรือดีกว่าวิธีที่กำหนดไว้ หรือเป็นวิธีการที่ลดปริมาณของสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วซึ่งจะต้องนำไปกำจัด ได้โดยการปรับสภาพหรือคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ให้นำมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reuse/recycle) ได้อย่างปลอดภัย ได้แก่ การนำกลับคืนมาใช้ของตัวทำละลาย (Solvent recovery) น้ำมัน (Oil recovery) กรด (Acid regeneration) และโลหะ (Metals recovery) หรือการทำเชื้อเพลิงผสม (Fuels blending) เพื่อใช้ในการเผาไหม้ในเตาเผาอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ (Co-incineration in industrial kilns/furnaces) หรือการแลกเปลี่ยนของเสีย (Wastes exchange) เพื่อให้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต-ตลอดจนการให้บริการการดำเนินการต่าง ๆ ดังกล่าวของบุคคลอื่นแทน

ข้อ 2 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียร (Stabilization) และการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) แล้ว จะต้องมีความสมบัติดังต่อไปนี้

2.1 สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่เกิดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย

2.2 มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

2.3 มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์และปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีการที่ระบุในข้อ 3 ก่อนการนำไปฝังกลบ

ข้อ 3 การสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

3.1 การสกัดสารเพื่อทดสอบหาปริมาณสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable) จากสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว และเพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์แล้วนั้น ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

3.1.1 หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วเป็นของเหลว หรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 3.2

3.1.2 หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว มีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.5 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

(2) นำตัวอย่างที่ได้จาก (1)หนัก 100 กรัม เติมน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดด่างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของส่วนผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

(3) เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

(4) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

(5) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 3.2.

3.2 การวิเคราะห์หาสารอันตรายต่างๆ ในของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วจากข้อ 3.1.1 หรือข้อ 3.1.2 ให้ใช้วิธีมาตรฐาน US EPA SW 846 หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2539 ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์ของสารละลายจากการสกัด (Leachate) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานดังที่ระบุในข้อ 5 หมวด 1 ของภาคผนวกที่ 1 ให้ดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่ เพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

(Ammonium saturation method)

หลักการ

อนุภาคขนาดดินเหนียว (clay size particle) ในดินมีอยู่ 2 ชนิด คืออนุภาคออร์แกนิก (organic particles) ได้แก่ silicate clay และ hydrous oxides ของเหล็กและอะลูมิเนียม เป็นอีกชนิดหนึ่งคืออนุภาคอินทรีย์ (organic particles) อนุภาคทั้งสองชนิดนี้มีประจุ (charge) ประเภทคือ ประจุถาวร (permanent charge) และประจุผันแปร (variable charge) ปริมาณประจุถาวรในดินจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปตามค่า pH ของดิน แต่ปริมาณประจุผันแปรในดินจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อ pH ของดินเปลี่ยนไป

เนื่องจากค่า CEC สัมพันธ์กับผลรวมของปริมาณแคตไอออนที่เกิดจากประจุถาวรและประจุผันแปร การวิเคราะห์ปริมาณ CEC ในดินจึงเป็นวิธีการอย่างหนึ่งในการประเมินอุดมสมบูรณ์ของดินในภาพรวมทั้งหมด และศักยภาพในการตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ย นอกจากนี้สามารถใช้บ่งบอกชนิดของแร่ดินเหนียวในดินได้อย่างกว้างๆ วิธีการวิเคราะห์ CI หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีต้องกำหนดค่า pH

การวิเคราะห์หาค่า C.E.C. ในดินโดยการทำให้ดินอิ่มตัวด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (NH_4OAc 1 M pH 7) เป็นวิธีการอย่างหนึ่ง วิธีนี้แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ คือ :

ขั้นตอนที่ 1 การทำให้ดินอิ่มตัวและชะล้าง (Saturation and leaching step) เป็นทำให้ดินอิ่มตัวด้วย NH_4^+ ion โดยการแช่ดินด้วย neutral NH_4OAc เพื่อให้ NH_4^+ ion จากสารละลาย NH_4OAc เข้าไปแทนที่ ion ประจุบวกของดิน กรองและล้างตัวอย่างด้วยสารละลาย NH_4OAc ตามด้วย NH_4Cl เพื่อให้ NH_4^+ เข้าแทนที่ native cations ต่าง ๆ ในดินจนอิ่มตัวอย่างเต็มที่

ขั้นตอนที่ 2 การล้าง (Washing step) เป็นการล้างดินด้วย ethyl alcohol 95 % เพื่อ NH_4^+ ส่วนเกินที่ไม่ได้ถูกดูดซับไว้ออกจากดินให้หมด

ขั้นตอนที่ 3 การแทนที่ (Replacing step) ให้ Na^+ เข้าไปแทนที่ NH_4^+ ในดิน โดยสารละลาย acidified NaCl



สำเนาไม่ควบคุม

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

สาขาเชียงใหม่

(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้กับลูกค้าบริษัท เท่านั้น)

อุปกรณ์

1. ขวดชมพู (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มล.
2. ขวดกรอง (Filtering flask) ขนาด 500 มล.
3. ขวดกลั่น (Kjeldahl flask) ขนาด 800 มล.
4. ขวดพลาสติกทนกรดทนด่างขนาด 10 และ 20 ลิตร
5. กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
6. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5
7. เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
8. เครื่องกลั่น (Distillation apparatus)
9. บิวเรต (Burette) ขนาด 50 มล.
10. เครื่องกวน (Magnetic stirrer)

สารเคมี

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate, NH_4OAc) 1M pH 7.0
2. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) 1 M pH 7.0
3. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 M
4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) 10 % acidified
5. เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) 95 %
6. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3 %
7. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)
8. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) 1 %
9. สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) 0.10 M
10. สารละลายกรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 M
11. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M
12. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 %
13. โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลท (Potassium hydrogen phthalate)



สำเนาไม่ควบคุม

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

สาขาเชียงใหม่

(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ไว้กับลูกค้าบริษัทเท่านั้น)

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate, NH_4OAc) 1 M pH 7.0

เตรียมโดยใส่น้ำกลั่นประมาณ 16 ลิตรในขวดพลาสติกทนกรดทนด่างขนาด 20 ลิตร กรดกลacial acetic acid, 99.5 %) 1,136 มล. และสารละลายแอมโมเนีย solution, NH_4OH , 25 %) 1,500 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปให้มีปริมาตรประมาณ 19 ลิตร ผสมทั้งสองให้เข้ากัน ปรับ pH ของน้ำยาให้เป็น pH 7.0 โดยใช้สารละลายแอมโมเนียหรือกรดกลacial acetic acid แล้วจึงปรับปริมาตรให้เป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH_4Cl) 1 M pH 7.0

ละลาย NH_4Cl 1 กิโลกรัม ในน้ำกลั่น 18 ลิตร ปรับ pH เป็น 7.0 ด้วย NH_3 solution หรือ HCl แล้วจึงเติมน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 19 ลิตร

3. สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 M pH 7.0

ตวง 2.5 ลิตร NH_4Cl 1 M (สารละลายข้อ 2) ใส่ในน้ำกลั่น 7 ลิตร แล้วปรับ pH เป็น 7.0 แล้วจึงปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) 10 % acidified

เตรียมโดยละลาย NaCl 2 กิโลกรัม ในน้ำกลั่น 18 ลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น มล. จนให้ละลาย แล้วทำให้เป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

5. สารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3 %

ค่อยๆ ละลายกรดบอริก 600 กรัม ในน้ำกลั่นอุณหภูมิประมาณ $50 - 60^\circ\text{C}$ จนกรดบอริกละลายหมด จึงปรับปริมาตรทั้งหมดเป็น 20 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น

6. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator solution)

ละลายโบรโมครีซอลกรีน (bromocresol green) 0.22 กรัม และเมทิลเรด (methyl red) 0.075 กรัม ใน 95 % เอทิลแอลกอฮอล์ (ethyl alcohol) 96 มล. ที่ใส่ 3.5 มล. ของ 0.1 M NaOH แล้ว

7. สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) 1 %

ละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน 1 กรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มล.



ตำนานไม่ควมคุม

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

สาขาเชียงใหม่

(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้กับลูกค้าของบริษัทฯ เท่านั้น)

4. ล้างตัวอย่างดินด้วย 1 M NH_4Cl pH 7.0 5 ครั้ง ๆ ละ ประมาณ 20 มล.
5. ล้างตัวอย่างดินด้วย 0.25 M NH_4Cl pH 7.0 ประมาณ 20 มล. 1 ครั้ง
6. ล้างด้วย ethyl alcohol 95 % อีก 5 - 6 ครั้ง ๆ ละ ประมาณ 20 มล. ทุกครั้งที่ล้างใช้กระบอกฉีกล้างตัวอย่างดินที่อาจติดค้างอยู่ที่ปาก buchner funnel ให้ลงไปรวมอยู่ในกรวยให้หมด สารละลายได้จากข้อ 3 - ข้อ 6 เททิ้งไป (การล้างด้วย alcohol เพื่อล้างแอมโมเนียมส่วนเกินที่ติด แลกเปลี่ยนออกให้หมด ซึ่งทดสอบได้จากปริมาณคลอไรด์ไม่มีหลงเหลืออยู่ในดินโดย สารละลาย AgNO_3 0.1 M 1 - 2 หยด ลงในสารละลายที่รองรับมาจาก buchner funnel โดยด ไม่ได้หยดลงสู่ขวดกรอง ถ้ามีตะกอนสีขาวเกิดขึ้นแสดงว่ายังล้างแอมโมเนียมไม่หมด ดึง ตัวอย่างดินด้วย ethyl alcohol 95 % ต่อไปอีก แล้วทดสอบคลอไรด์ใหม่ดังที่กล่าวมาแล้ว ไม่มีตะกอนสีขาวนั้นแสดงว่าล้างแอมโมเนียมหมดแล้ว)
7. เปลี่ยนขวดกรองใหม่สำหรับรองรับสารละลายใหม่ ล้างตัวอย่างดินที่ยังอยู่ในกรวย buchner ข้อ 6 ด้วย acidified NaCl 10 % แต่ครั้งที่ล้างให้ใส่สารละลาย NaCl ให้ท่วมตัวอย่าง จนกระทั่งได้สารละลายที่กรองได้ (leachate) ประมาณ 300-350 มล.
8. ถ่ายได้สารละลายที่กรองได้ใส่ในขวดกลั่น ล้างขวดกรองด้วยน้ำกลั่นและเทน้ำที่ล้างรวมลง ในขวดกลั่น
9. นำขวดกลั่นไปกลั่น โดยเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงไปในขวดกลั่นให้มากเกินพอ (ประ 30 มล.) โดยมีสารละลายกรดบอริก (H_3BO_3) 3% ประมาณ 30 มล. ใส่ในขวดผสมพู่ขนาด 500 คอยรองรับสารละลายที่กลั่นออกมาได้ และในสารละลายกรดบอริกนี้ใส่อินดิเคเตอร์ผสมประ 5 หยด ใช้เวลากลั่น ประมาณ 40 - 45 นาที หรือจนกลั่นได้สารละลายประมาณ 250-275 มล.
10. นำสารละลายที่กลั่นได้ในขวดผสมพู่ที่รองรับไปไตเตรทกับสารละลายกรดเกลือ 0.1 N จุดยุติ ของอินดิเคเตอร์ในสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง บันทึกปริมาตรของกรดเกลือที่ ไตเตรท แล้วนำมาคำนวณค่า CEC
11. นำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 10 % ที่ใช้ล้างดินมากลั่นเป็น Blank โดยทำเช่นเดียวกับตัว ดิน

วิธีคำนวณ

$$\text{CEC (cmol/kg)} = \frac{(T - B) \times N \times 100 \times AD}{OD}$$

Sample wt. (gm.)



ตำนานไม้ควมคุม

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด

สาขามลพิษ

(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้กับลูกค้าบริษัทเท่านั้น)

เจือจางกรดเกลือเข้มข้น 82.7 มล. ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตร (ประเทศ)
สาขาเชียงใหม่

9. สารละลาย AgNO_3 0.1 M

(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้กับบุคลากรในวิทยาลัย)

ละลายซิลเวอร์ไนเตรท 1.7 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มล. เก็บสารละลายนี้ในขวดสีชา

10. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M

ละลาย NaOH 40 กรัม ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

11. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 %

ละลาย NaOH 4 กิโลกรัม ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 10 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

12. การ Standardization NaOH ด้วยโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลท (potassium hydrophthalate)

ซังโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลท (Potassium hydrogen phthalate, KHP, $[\text{COOK}]\text{COOH}$), น้ำหนักกรัมสมมูล 204.23 กรัม) ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C ด้วยเครื่องเย็บ 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.4 กรัม บันทึกน้ำหนัก KHP ใส่ในขวดชมพูขนาด 125 มล. เติมน้ำประมาณ 20 มล. เขย่าจนละลายหมดจึงไปไทเทรตกับสารละลาย 0.1 M NaOH ที่เตรียมไว้ในโดยเติม 1 % phenolphthalein 2 - 3 หยด ไทเทรตจนสารละลายเปลี่ยนสีจากไม่มีสีเป็นสีชมพูจุดยุติ (end point) คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย NaOH จากสูตร:

$$\text{Normality ของ NaOH} = \frac{\text{น.น. เป็นกรัมของโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลท} \times 10}{\text{น้ำหนักกรัมสมมูลของกรด KHP} \times \text{ปริมาตรของ NaOH}}$$

วิธีทำ

1. ชั่งดิน 5 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 125 มล. เติมน้ำ $1\text{ M pH } 7.0\text{NH}_4\text{OAc}$ 50 มล. เขย่าให้เข้ากันดี ทิ้งไว้สัก
2. นำมากรองโดยใช้กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ต่อกับขวดกรอง ใช้กระดาษ Whatman No. 5 จำนวน 1 แผ่น (หรือใช้ No. 42 จำนวน 1 แผ่น หรือ No. 1 จำนวน 2 แผ่นก็ได้) ล้างตัวอย่างดินด้วย $1\text{ M NH}_4\text{OAc}$ pH 7.0 ที่ละน้อย หลาย ๆ ครั้ง จนได้ปริมาตร 100 มล. นำสารละลายที่กรองได้นี้ถ่ายใส่ Volumetric flask แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มล ไว้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ exchangeable cations Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ และ K^+ ต่อไป

B = บวม เติบโตเร็วเกินไป เติบโตเกินไป Bloat

N = ความเข้มข้นของกรดเกลือมีหน่วยเป็นนอร์มัลลิตี (normality)

AD / OD = อัตราส่วนน้ำหนักดินกับดินอบแห้ง (airdried / oven - dried ratio)

คำแนะนำ

ในการล้างดินแต่ละครั้งให้ค่อย ๆ ล้างสังเกตน้ำยาที่ผ่านกรวยอย่าให้ผ่านออกมาก โดยการควบคุมเปิดระบบสุญญากาศให้น้ำยาค่อย ๆ หยด ก่อนจะล้างดินครั้งต่อไปต้องนำยาในการล้างครั้งแรกไหลผ่านหมดไปก่อน และขณะล้างดินด้วยเอทิลแอลกอฮอล์อย่าทิ้งให้ตัวดินแห้ง เพราะถ้าดินแห้งในการล้างครั้งต่อไป ตัวอย่างดินอาจจะร่วงลงไปอยู่ในขวดกรองที่รอง

การแปลผล

ระดับปริมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน

CEC, cmol/kg	ระดับ
< 5	ต่ำมาก
5 – 15	ต่ำ
15 – 25	ปานกลาง
25 – 40	สูง
> 40	สูงมาก

เอกสารอ้างอิง

Chapman, H.D. 1965. Cation. Exchange Capacity. In Methods of soil analysis, part 2 N pp 891-913 Amer. Soc. Agron., Madison, Wis.

FAO. 1979 a. Soil Survey Investigation for Irrigation. Soil Bull. No. 42. FAO. Rome

Landon, J.R. 1991. Booker Tropical Soil Manual. Addison Wesley Longman Limited England.

กองวิเคราะห์ดิน. 2540. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีดินกับการวิเคราะห์ดินใน

ห้องปฏิบัติการ. กรมพัฒนาที่ดิน. กรุงเทพฯ.



ตำนานไร่

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประ)

สาขาเชียงใหม่

เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้ด้วย

หลักการวิเคราะห์ไนโตรเจน/โปรตีน ด้วยเทคนิคการเผาไหม้

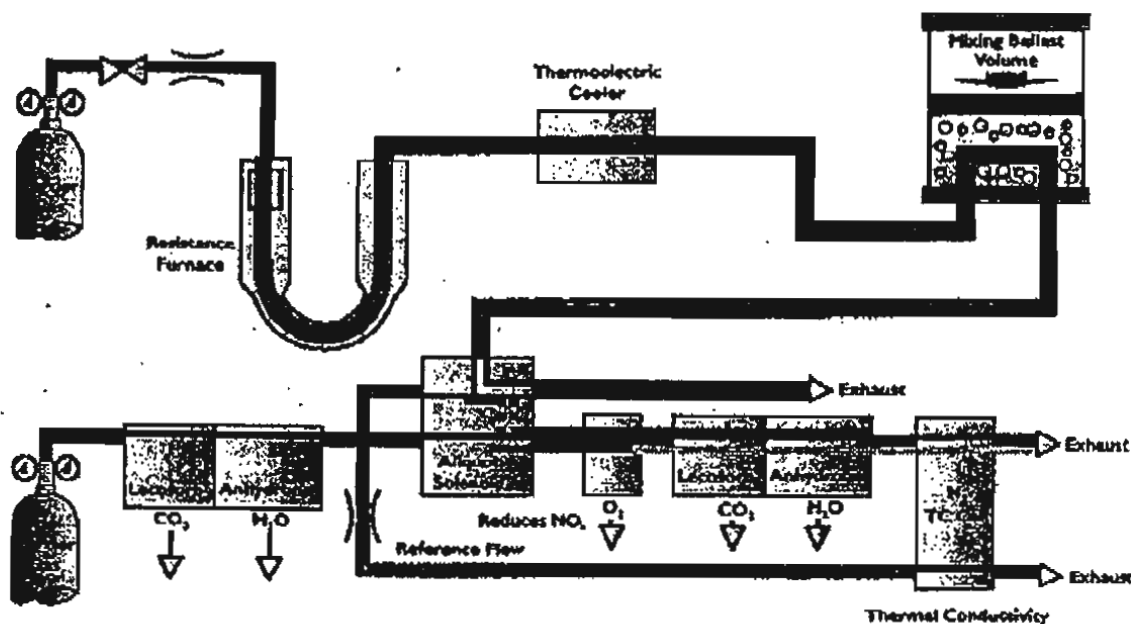
การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน/โปรตีนโดยใช้เทคนิค Classical Kjeldahl เริ่มมีการใช้มาตั้งแต่ปี 1881 จนถึงปัจจุบัน แต่พบว่าเทคนิคนี้มีข้อเสีย ดังต่อไปนี้

1. ผลการวิเคราะห์ไวต่อชนิดของเมทริกซ์ในตัวอย่าง (Matrix sensitivity)
2. ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา-มีความเป็นพิษสูง
3. เวลาในการวิเคราะห์ยาวนาน-3 ขั้นตอน (ย่อย-กลั่น-ไทเทรต)
4. ราคาต่อการวิเคราะห์ค่อนข้างสูง

การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน/โปรตีนด้วยเทคนิค Combustion หรือ Dumas method เริ่มมีใช้ตั้งแต่ปี 1826 ปัจจุบันวิธีการนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ คือ

1. ผลการวิเคราะห์ไม่ขึ้นกับเมทริกซ์ของตัวอย่าง (Matrix independent)
2. ไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษ
3. ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 3 นาที
4. ราคาต่อการวิเคราะห์น้อยกว่า Kjeldahl 50 %

หลักการวิเคราะห์ของ TruSpec N Combustion Method:



รุ่น TruSpec CN

รุ่น LECO



ผู้อนุมัติ..... 31/10/54

ผู้จำหน่าย..... 31/10/54

สำเนาไม่ควบคุม

หึ่งตัวอย่างขนาด 250 ถึง 350 mg (สามารถใช้ได้สูงสุด 1 กรัม) ใน Tin foil สำหรับตัวอย่าง
ของแข็ง หรือ Tin capsule สำหรับตัวอย่างของเหลว

ตัวอย่างถูก Drop ในเตาเผาชนิด "U-tube" อัดไนโตรเจนเพื่อออกแบบให้เกิดปฏิกิริยา oxidation
ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนและความร้อนให้นานที่สุด

เผาตัวอย่างในบรรยากาศออกซิเจน (99.99%) ที่ 850-950 °C โดยธาตุคูปที่ใช้บรรจุตัวอย่าง
จะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนภายใต้บรรยากาศออกซิเจน นี้เรียกว่า exothermic reaction ทำ
ให้อุณหภูมิการเผาตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็วถึง 1800 °C สถานะนี้จึงช่วยให้เกิดการเผาไหม้
ตัวอย่างให้สมบูรณ์มากขึ้น

ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ประกอบด้วย CO_2 , H_2O , NO_x และ N_2 จะไหลผ่าน
Quartz wool เพื่อกำจัดผงที่เกิดขึ้น (ใช้งานได้ 1000 ครั้ง) และ Steel wool เพื่อกำจัดเกลือ (ใช้งานได้
100 ครั้ง)

กำจัดน้ำในก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้ด้วยอุปกรณ์กำจัดน้ำที่เรียกว่า Thermoelectric Cooler
โดย ลดอุณหภูมิตั้งให้เหลือ 5 °C ทำให้ H_2O และ SO_2 บางส่วนจะถูกกำจัดออกไป

ผ่าน Particle filter เพื่อกำจัดฝุ่นผงขนาดเล็ก และ เกลือ ก่อนเข้าสู่ Ballast tank

ก๊าซที่เหลือจะไหลเข้าสู่ถังเก็บใน "Ballast tank" ซึ่งมีระดับน้ำที่คงที่และปล่อยให้ก๊าซอยู่ใน
ก๊าซที่เหลือไหลเข้าสู่ถังเก็บใน "Ballast tank" ขนาด 4.5 ลิตร และปล่อยให้ก๊าซอยู่ใน
สถานะ สมดุลเป็นเวลา 20 วินาที เพื่อให้ก๊าซทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน

ปริมาณก๊าซเนื้อเดียวกันจาก Ballast tank จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่อไปเพียง 3 มิลลิลิตร
โดย ผ่าน Aliquot loop ทำให้ลดปริมาณการใช้งานของสารเคมีและตัวเร่งปฏิกิริยาในลำดับต่อไปลง
ได้อย่างมาก

ก๊าซที่ได้จาก aliquot loop จะถูกพาคด้วยก๊าซ He ผ่าน Copper metal/N catalyst ที่อุณหภูมิ
750 °C (ใช้งานได้ 1500 ครั้ง) เพื่อกำจัดก๊าซออกซิเจน และเปลี่ยนออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x)
ไปเป็น N_2

กำจัด CO_2 ด้วย NaOH/Silica หรือ Lecosorb (ใช้งานได้ 800 ครั้ง)



อำนาจไม่ควบคุม

บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
สาขาเชียงใหม่

Nitrogen-Carbon Analysis Worksheet

Test by กิตติกร Date 27/10/64

Approved by [Signature] Date 27/10/64

TA	Mass (g)	method	% nitrogen
Blank	1	Method-F2	0.00245
Blank	1	Method-F2	0.00392
Blank	1	Method-F2	0.00014
Blank	1	Method-F2	-0.0036
Blank	1	Method-F2	-0.00292
EDTA	0.2005	Method-F2	9.4128
EDTA	0.2017	Method-F2	9.571
EDTA	0.2012	Method-F2	9.5702
EDTA	0.2008	Method-F2	9.5593
EDTA	0.2014	Method-F2	9.5411
CRM8.7+0.3	0.107	Method-F2	8.0295
CRM13.4+0.4	0.102	Method-F2	13.045
CRM15.3+0.4	0.1071	Method-F2	15.277
54/18865-001	0.2017	Method-F2	1.9663
54/18865-002	0.2001	Method-F2	1.9923
54/18865-003	0.2024	Method-F2	2.3581
54/18865-004	0.2023	Method-F2	2.356
54/18865-005	0.2032	Method-F2	1.9126
54/18865-006	0.202	Method-F2	1.9029
54/18865-007	0.2019	Method-F2	2.4655
54/18865-008	0.2074	Method-F2	2.4348
54/18865-009	0.2039	Method-F2	2.0134
54/18865-010 -1	0.2049	Method-F2	1.9956
54/18865-010 -2	0.2002	Method-F2	1.9992
CRM 8.7+0.3	0.1065	Method-F2	8.4072
54/18865-011	0.2026	Method-F2	2.4153
54/18865-012	0.203	Method-F2	2.3722
54/18865-013	0.2066	Method-F2	1.7626
54/18865-014	0.2007	Method-F2	1.7873
54/18865-015	0.2135	Method-F2	2.1681
54/18865-016	0.2005	Method-F2	2.1558

1.9974



บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
สาขาเชียงใหม่
(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้กับลูกค้าบริษัท เท่านั้น)

Nitrogen-Carbon Analysis Worksheet

Test by กัมภีร์ Date 28/10/54

Approved by [Signature] Date 29/10/54

TA	Mass (g)	method	% nitrogen
Blank	1	Method-F2	0.00257
Blank	1	Method-F2	-0.00127
Blank	1	Method-F2	-0.00075
Blank	1	Method-F2	0.0006
Blank	1	Method-F2	-0.00116
EDTA	0.2049	Method-F2	9.5683
EDTA	0.2002	Method-F2	9.5542
EDTA	0.2006	Method-F2	9.5587
CRM 8.7±0.3	0.1043	Method-F2	8.8118
CRM 13.4±0.4	0.104	Method-F2	13.192
CRM 15.3±0.4	0.1034	Method-F2	15.43
54/18865-17	0.2015	Method-F2	0.06643
54/18865-18	0.2032	Method-F2	0.0674
54/18865-19	0.2067	Method-F2	0.06748
54/18865-20	0.202	Method-F2	0.06953
54/18865-20	0.2023	Method-F2	0.06219
CRM 8.7±0.3	0.1222	Method-F2	8.7085
54/18865-21	0.2064	Method-F2	0.06511
54/18865-22	0.2041	Method-F2	0.06593
54/18865-23	0.2021	Method-F2	0.06644
54/18865-24	0.202	Method-F2	0.05463
54/18865-25	0.2032	Method-F2	0.06724
54/18865-26	0.2032	Method-F2	0.06416
54/18865-27	0.2016	Method-F2	0.05721
54/18865-28	0.2017	Method-F2	0.06779
54/18865-29	0.2021	Method-F2	0.07322
54/18865-30	0.2018	Method-F2	0.0583
54/18865-30	0.2011	Method-F2	0.07209
CRM 8.7±0.3	0.1072	Method-F2	8.4635
54/18865-31	0.2013	Method-F2	0.07587
54/18865-32	0.2032	Method-F2	0.08237
54/18865-33	0.2006	Method-F2	0.06766
54/18865-34	0.2044	Method-F2	0.07953
54/18865-35	0.2024	Method-F2	0.07525
54/18865-36	0.2019	Method-F2	0.07963
54/18865-37	0.2054	Method-F2	0.06824
54/18865-38	0.2001	Method-F2	0.08165
54/18865-39	0.2019	Method-F2	0.07957
54/18865-40	0.2047	Method-F2	0.07752
54/18865-40	0.2013	Method-F2	0.06757
CRM 8.7±0.3	0.102	Method-F2	8.7047
54/18865-41	0.2075	Method-F2	0.0742
54/18865-42	0.2034	Method-F2	0.04274
54/18865-43	0.2026	Method-F2	0.06754
54/18865-44	0.2013	Method-F2	0.06875



บริษัท ท้องถิ่นการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
สาขาเชียงใหม่
(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้ใช้กับลูกค้าบริษัทฯ เท่านั้น)

0.0654

0.0652

0.0726

54/18865-45	0.2037	Method-F2	0.06733
54/18865-46	0.2017	Method-F2	0.06003
54/18865-47	0.2093	Method-F2	0.08956
54/18865-48	0.2024	Method-F2	0.06395
54/18865-49	0.2034	Method-F2	0.06993
54/18865-50	0.2043	Method-F2	0.06556
54/18865-50	0.2019	Method-F2	0.06482
CRM 8.7+0.3	0.1048	Method-F2	0.0578
54/18865-51	0.202	Method-F2	0.05978
54/18865-52	0.2089	Method-F2	0.06969
CRM 8.7+0.3	0.1031	Method-F2	8.6774



บริษัท หอปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
สาขาเชียงใหม่
(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้กับลูกค้าบริษัทฯ เท่านั้น)

TRUSPEC

Method-F2 Calibration - Read Only

Lithogen (range: 5.047680 to 23.966920 mg)

Previous Calibration:

$$y = +1.24748x + 0$$

Date: 8/26/2011 11:58:41 AM

New Calibration:

$$y = +1.24748x + 0$$

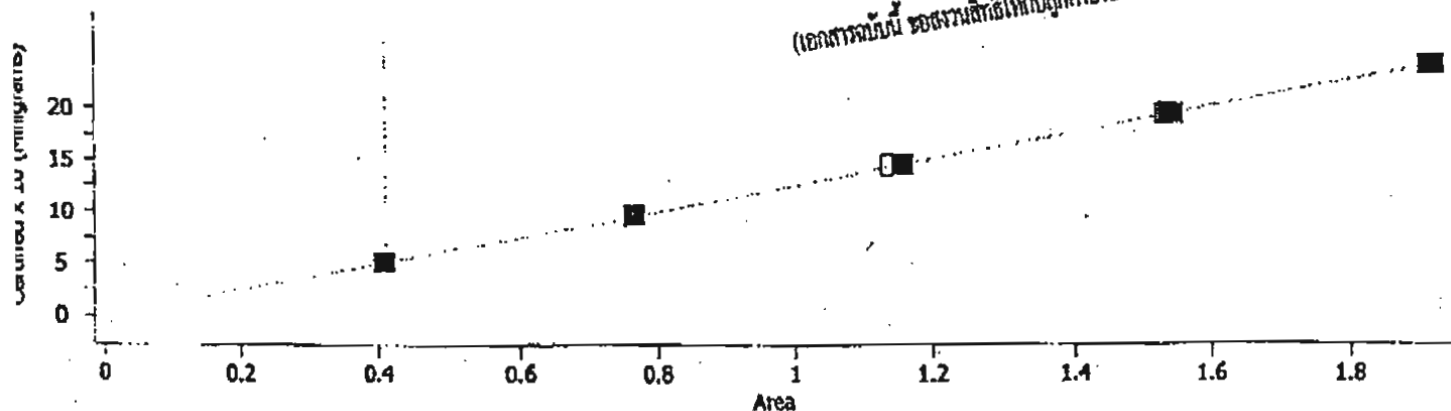
Curve Type: Single Standard Calibration

Weighting: 1 / Variance

RMS Error: 0.068142



บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด
สาขาเชียงใหม่
(เอกสารฉบับนี้ ขอสงวนสิทธิ์ให้บุคคลภายในเท่านั้น)



Row	Standard	Drift	Area	Conc	Calculated	Error	Area	Conc	Peak Area	Weighting	Date
1	EDTA	0	0.052800	9.5600	9.7035	1.5013	1.5013	0.57402	0.41070	1.9811	08/26/11 10:34 AM
2	EDTA	0	0.053300	9.5600	9.5524	-0.079172	-0.079172	0.57043	0.40814	1.9625	08/26/11 10:38 AM
3	EDTA	1	0.053500	Excluded	9.6055	0.47577	0.47577	0.57502	0.41195	1.9552	08/26/11 10:42 AM
4	EDTA	0	0.053100	9.5600	9.5672	0.075195	0.075195	0.56861	0.40724	1.9699	08/26/11 10:46 AM
5	EDTA	0	0.10060	9.5600	9.5005	-0.62282	-0.62282	1.0613	0.76614	1.0398	08/26/11 10:50 AM
6	EDTA	0	0.10070	9.5600	9.5139	-0.48207	-0.48207	1.0627	0.76799	1.0388	08/26/11 10:54 AM
7	EDTA	0	0.10090	9.5600	9.4449	-1.2044	-1.2044	1.0572	0.76393	1.0367	08/26/11 10:59 AM
8	EDTA	1	0.10060	Excluded	9.4648	-0.99569	-0.99569	1.0593	0.76327	1.0398	08/26/11 11:03 AM
9	EDTA	0	0.15080	9.5600	9.5657	0.059182	0.059182	1.5790	1.1563	0.69365	08/26/11 11:07 AM
10	EDTA	0	0.15090	9.5600	9.5745	0.15200	0.15200	1.5876	1.1582	0.69319	08/26/11 11:11 AM
11	EDTA	1	0.15030	Excluded	9.4740	-0.89955	-0.89955	1.5605	1.1415	0.69596	08/26/11 11:15 AM
12	EDTA	0	0.15100	9.5600	9.5877	0.29017	0.29017	1.5781	1.1605	0.69273	08/26/11 11:19 AM
13	EDTA	0	0.20050	9.5600	9.6188	0.61454	0.61454	2.0883	1.5460	0.52171	08/26/11 11:23 AM
14	EDTA	1	0.20020	Excluded	9.5463	-0.14366	-0.14366	2.0791	1.5320	0.52249	08/26/11 11:28 AM
15	EDTA	0	0.20060	9.5600	9.5913	0.32789	0.32789	2.0827	1.5423	0.52145	08/26/11 11:32 AM
16	EDTA	0	0.20080	9.5600	9.5432	-0.17561	-0.17561	2.0759	1.5361	0.52093	08/26/11 11:36 AM
17	EDTA	0	0.25070	9.5600	9.5202	-0.41668	-0.41668	2.5820	1.9132	0.41724	08/26/11 11:40 AM
18	EDTA	0	0.25030	9.5600	9.5508	-0.096600	-0.096600	2.5947	1.9163	0.41791	08/26/11 11:44 AM
19	EDTA	1	0.25060	Excluded	9.5746	0.15229	0.15229	2.5898	1.9234	0.41741	08/26/11 11:48 AM
20	EDTA	0	0.25040	9.5600	9.5783	0.19120	0.19120	2.5878	1.9226	0.41774	08/26/11 11:52 AM

10.2 2 M POTASSIUM CHLORIDE EXTRACTION (NITRATE AND AMMONIUM DETERMINATION)

1. Principle of the Method

1.1. The Extraction Reagent is 2 M potassium chloride (KCl) (Dahnke and Johnson, 1990; Anon., 1994a; Mulvaney, 1996). The nitrate (NO_3^-) is soluble in any water-based solution and ammonium (NH_4^+) ions on colloidal exchange sites are brought into solution by exchange with the potassium (K^+) ion.

2. Range, Sensitivity, and Analysis Procedure

2.1. The range and sensitivity are the same as those for other methods of NO_3^- and NH_4^+ determination.

2.2. The NO_3^- concentration in the extractant is determined by a specific ion electrode (Mills, 1980; Johnson, 1992) and both NO_3^- and NH_4^+ by spectrophotometric methods (Watson and Isaac, 1990; Mulvaney, 1996), or Kjeldahl distillation (Anon., 1994b).

3. Interferences

3.1. The Extracting Reagent is stable with regard to pH and no interferences are likely if chloride (Cl) ions present are masked.

4. Precision and Accuracy

4.1. A coefficient of variability ranging from 5 to 10% can be expected for different determinations.

5. Apparatus

5.1. No. 10 (2-mm opening) sieve.

5.2. Analytical balance.

5.3. 125-mL polyethylene conical flasks.

5.4. Eberbach reciprocating shaker (or equivalent), 180 oscillations per minute.

5.5. Whatman No. 2 filter paper (or equivalent), 11 cm.

5.6. UV-VIS spectrophotometer set at 420 nm.

5.7. 2.5-cm matching spectrophotometric tubes.

5.8. Nitrate specific-ion electrode and meter.

5.9. pH meter readable to 0.01 pH units.

5.10. Funnels and funnel rack.

5.11. Accurate automatic diluter.

5.12. Volumetric flasks and pipettes as required for preparation of reagents and standard solutions.

6. Reagents (use reagent grade chemical and pure water)

6.1. **Extraction Reagent** (2 M Potassium Chloride): Weigh 150 g potassium chloride (KCl) into a 1,000-mL volumetric flask and bring to volume with water.

6.2. Antimony Sulfate Solution: Weigh 0.5 g antimony metal (Sb) in 80 mL conc. sulfuric acid (H_2SO_4), and then add 20 mL water to the acid carefully to prevent splattering. Heating will facilitate the dissolution of antimony (Sb) metal in H_2SO_4 . This solution is used for masking (complexing) chloride (Cl) in the NO_3 determination.

6.3. Chromotropic Acid Solution (CTA) [0.00137 M solution of CTA or 4,5-dihydroxy-2,7-naphthalene-disulfonic acid, disodium salt $[(\text{HO})_2\text{C}_{10}\text{H}_4(\text{SO}_3\text{Na})_2]$]: Weigh 0.5 g CTA in 4.0 kg conc. H_2SO_4 . This solution is used to develop color with NO_3 .

6.4. Fisher G Carbon Black: used to eliminate organic matter interference.

7. Procedures

7.1. Extraction Method: Weigh 10 g air-dry soil <10-mesh (2-mm) into a 125-mL conical flask, add 50 mL Extraction Reagent (see 6.1), and shake on an Eberbach reciprocal shaker or an equivalent shaker for exactly 15 minutes at 180 cycles per minute. The extract is then filtered through Whatman 42 filter paper.

7.2. Nitrate Determination: Mix 5 mL of the soil extract (see 7.1) with one 1-mL scoop of Fisher G Carbon Black (see 6.4), shake for 5 minutes or longer if required to decolorize the solution, and filter. Place a 0.5 mL aliquot of the latter decolorized soil extract, Working Standards (see 8.2) and 2 M KCl [0.00 $\text{NO}_3\text{-N}$ solution (see 6.1)] into 2.5-cm matching spectrophotometric tubes. Add 3.0 mL water to each tube using an automatic diluter. Add 2.0 mL Antimony Sulfate Solution (see 6.4), followed by 6.5 mL CTA (see 6.5) in quick succession to each tube. Mix thoroughly for consistent results. After two hours of cooling in tap water, the spectrophotometer is set at zero absorbance at 420 nm with the 0.00 $\text{NO}_3\text{-N}$ solution. The color intensity (absorbance) of soil extracts is read after two hours.

7.3. Ammonium Determination: Follow the procedures as described by Dahnke and Johnson (1990), Mulvaney (1996), or the steam distillation procedure described in the WREP Bulletin 125 (Anon., 1994b)

8. Standards

8.1. Primary Nitrate-N Standard (1,000 $\text{NO}_3\text{-N L}^{-1}$): Commercially prepared standard, or weigh 7.22 g potassium nitrate (KNO_3) into a 1,000-mL volumetric flask and bring to volume with water.

8.2. Working Nitrate-N Standards: Pipette 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2.5 mL aliquots of the Primary Nitrate-N Standard (see 8.1) into 100-mL volumetric flasks and bring to volume with Extraction Reagent (see 6.1) in order to obtain a series of standards containing 2.5, 5, 10, 15, and 25 mg $\text{NO}_3\text{-N L}^{-1}$, respectively.

8.3. Primary Ammonium-N Standard (1,000 mg $\text{NH}_4\text{-N L}^{-1}$): Commercially prepared standard, or weigh 4.72 g ammonium sulfate $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ into a 1,000-mL volumetric flask and bring to volume with water.

8.4. Working Ammonium-N Standards: Pipette 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2.5 mL aliquots of the Primary Ammonium-N Standard (see 8.3) into 100-mL volumetric flasks and

bring to volume with Extraction Reagent (see 6.1) in order to obtain a series of standards containing 2.5, 5, 10, 15, and 25 mg $\text{NH}_4\text{-N L}^{-1}$, respectively.

9. Calculations

9.1. $\text{mg NO}_3\text{- or NH}_4\text{-N kg}^{-1}$ in soil = $\text{mg NO}_3\text{ or NH}_4\text{-N L}^{-1}$ in extract $\times 48$.

10. Effects of Storage

10.1. Air-drying and storage should not have any significant effect on the level of NO_3 or NH_4 in the soil (Houba and Novozamsky, 1998).

11. Interpretation

11.1. Interpretation of the test results will depend on their use as described by Magdoff et al. (1984), Magdoff et al. (1990), Dahnke and Johnson (1990), Soltanpour (1991), Schmitt and Randall (1994) and Muchovej and Rechcigl (1995).

10.3 0.01 M CALCIUM SULFATE OR 0.04 M AMMONIUM SULFATE EXTRACTION (NITRATE DETERMINATION)

1. Principle of the Method

1.1. The Extraction Reagent is either 0.01 M calcium sulfate (CaSO_4) or 0.04 M ammonium sulfate $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ as nitrate (NO_3) is soluble in any water-based solution.

2. Range, Sensitivity, and Analysis Procedure

2.1. The range and sensitivity are the same as those for other methods of NO_3 determination.

2.2. The NO_3 concentration in the extractant is determined by a specific ion electrode (Mills, 1980; Johnson, 1992) or spectrophotometric methods (Watson and Isaac, 1990; Mulvaney, 1996).

3. Interferences

3.1. The Extraction Reagents are stable with regard to pH and no interferences are likely if chloride (Cl) ions present are masked.

4. Precision and Accuracy

4.1. A coefficient of variability ranging from 5 to 10% can be expected for different determinations.

5. Apparatus

5.1. No. 10 (2-mm opening) sieve.

5.2. Analytical balance.

5.3. 125-mL polyethylene conical flasks.

5.4. Eberbach reciprocating shaker (or equivalent), 180 oscillations per minute.

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ pH ของเมล็ดลูกดินที่สูตรต่างกัน

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
formula-1	2	16.87	8.435	5E-05
formula-2	2	18.14	9.07	0.0002
formula-3	2	15.42	7.71	0.02
formula-5	2	17.51	8.755	0.00125
formula-6	2	14.14	7.07	0.0162
formula-10	2	13.28	6.64	0.0098
formula-15	2	13.9	6.95	0.005

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	11.074243	6	1.8457071	246.09429	8.864E-08	3.8659689
Within Groups	0.0525	7	0.0075			
Total	11.126743	13				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่าการดูดซึมน้ำ ของเมล็ดลูกดินที่สูตรต่างกัน

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
formula-1	2	163	81.5	4.5
formula-2	2	224	112	2
formula-3	2	146	73	2
formula-5	2	200	100	18
formula-6	2	127	63.5	0.5
formula-10	2	112	56	2
formula-15	2	100	50	0

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	6282.429	6	1047.071	252.7414	8.08E-08	3.865969
Within Groups	29	7	4.142857			
Total	6311.429	13				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่าความหนาแน่น ของเมล็ดลูกดินที่สูตรต่างกัน

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
formula-1	3	5237	1745.667	870.3333
formula-2	3	4402	1467.333	7492.333
formula-3	3	4488	1496	31741
formula-5	3	4396	1465.333	2572.333
formula-6	3	4860	1620	38719
formula-10	3	5228	1742.667	1474.333
formula-15	3	5639	1879.667	13002.33

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	480093.6	6	80015.6	5.842281	0.003131	2.847726
Within Groups	191743.3	14	13695.95			
Total	671837	20				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่าการยุยตัว ของเม็ดลูกดินที่สูตรต่างกัน

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
formula-1	2	0.07	0.035	5E-05
formula-2	2	0.59	0.295	0.00045
formula-3	2	4.18	2.09	8.3232
formula-5	2	0.5	0.25	0.0128
formula-6	2	0.1	0.05	0.0008
formula-10	2	0.1	0.05	0.0008
formula-15	2	0.23	0.115	0.00005

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	6.696086	6	1.116014	0.93691	0.523559	3.865969
Within Groups	8.33815	7	1.191164			
Total	15.03424	13				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่าความแข็ง ของเม็ดลูกดินที่สูตรต่างกัน

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
formula-1	5	340.06	68.012	1107.611
formula-2	5	200.35	40.07	11.49185
formula-3	5	675.8	135.16	2800.093
formula-5	5	222.47	44.494	19.94518
formula-6	5	794.2	158.84	328.628
formula-10	5	538.5	107.7	107.455
formula-15	5	469.5	93.9	93.565

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	60534.74	6	10089.12	15.80381	7.62E-08	2.445259
Within Groups	17875.16	28	638.3984			
Total	78409.9	34				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่าความชื้น ของเม็ดลูกดินที่การเตรียมเงื่อนไขต่างกัน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Temp-Ambient	4	92.85	23.2125	0.284492
Temp-75 °C	4	36.83	9.2075	5.804292
Formula-3 (50)	2	35.35	17.675	74.05445
Formula-3 (100)	2	32.68	16.34	75.3992
Formula-6 (50)	2	29.24	14.62	151.0322
Formula-6 (100)	2	32.41	16.205	100.6781

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Temperatures	392.2801	1	392.2801	132.4696	0.001408	10.12796
Formulas	9.3825	3	3.1275	1.05613	0.482623	9.276628
Error	8.88385	3	2.961283			
Total	410.5464	7				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า Total-N ของเมล็ดลูกดินที่การเตรียมเงื่อนไขต่างกัน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Temp-Ambient	4	7.67	1.9175	0.009892
Temp-75 °C	4	9.38	2.345	0.014967
Formula-3 (50)	2	4.34	2.17	0.0722
Formula-3 (100)	2	4.36	2.18	0.1458
Formula-6 (50)	2	4.4	2.2	0.08
Formula-6 (100)	2	3.95	1.975	0.07605

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Temperatures	0.365513	1	0.365513	128.4378	0.001474	10.12796
Formulas	0.066038	3	0.022013	7.734993	0.063452	9.276628
Error	0.008537	3	0.002846			
Total	0.440088	7				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า Nitrate-N ของเมล็ดลูกดินที่การเตรียมเงื่อนไขต่างกัน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Temp-Ambient	4	8.4	2.1	0.034133
Temp-75 °C	4	9.05	2.2625	0.209092
Formula-3 (50)	2	4.85	2.425	0.47045
Formula-3 (100)	2	4.52	2.26	0
Formula-6 (50)	2	3.88	1.94	0
Formula-6 (100)	2	4.2	2.1	0.0512

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Temperatures	0.052813	1	0.052813	0.337937	0.601819	10.12796
Formulas	0.260838	3	0.086946	0.556349	0.678985	9.276628
Error	0.468838	3	0.156279			
Total	0.782488	7				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า EC ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างด้วยน้ำกลั่น

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
hr-1	10	15382.8	1538.28	17207969
hr-3	10	12751.7	1275.17	13366951
hr-6	10	10854.87	1085.487	10166596
hr-9	10	7303.203	730.3203	4624210
hr-12	10	5540.787	554.0787	2665696
hr-24	10	6955.367	695.5367	4480880
hr-48	10	2417.387	241.7387	468773.1
hr-72	10	1357.39	135.739	114385.8
hr-96	10	747.1467	74.71467	38060.71
hr-120	10	641.11	64.111	31603.89
hr-240	10	726.5667	72.65667	43907.61
Exp-1	11	59106	5373.273	22630102
Exp-2	11	348.44	31.67636	831.4141
Exp-3	11	688.9533	62.63212	6526.14
Exp-4	11	894.8767	81.35242	13659.65
Exp-5	11	734.3633	66.7603	15643.84
Exp-6	11	707.1733	64.28848	3124.189
Exp-7	11	862.6967	78.42697	5520.711
Exp-8	11	504.2567	45.84152	2899.249
Exp-9	11	347.91	31.62818	1467.15
Exp-10	11	483.6533	43.96848	1258.897

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Hours	27836347	10	2783635	1.259095	0.265666	1.937567
Experiments	2.8E+08	9	31100812	14.06753	6.88E-14	1.985595
Error	1.99E+08	90	2210822			
Total	5.07E+08	109				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า EC ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างด้วยสารละลายดินสังเคราะห์

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
hr-1	10	16955.33	1695.533	14497320
hr-3	10	15151.03	1515.103	10968099
hr-6	10	11879.67	1187.967	5797453
hr-9	10	8430.333	843.0333	2323638
hr-12	10	6997	699.7	1320468
hr-24	10	7246.667	724.6667	1560571
hr-48	10	5989.333	598.9333	729658.3
hr-72	10	5032.667	503.2667	291639.4
hr-96	10	4628	462.8	193829.5
hr-120	10	3972.663	397.2663	54824.74
hr-240	10	3526	352.6	9875.674
Exp-1	11	53424	4856.727	16059194
Exp-2	11	3767.667	342.5152	813.6081
Exp-3	11	4116.667	374.2424	5195.558
Exp-4	11	4268.667	388.0606	11428.17
Exp-5	11	3863.333	351.2121	2487.095
Exp-6	11	4219.333	383.5758	6653.069
Exp-7	11	4091.333	371.9394	5762.329
Exp-8	11	4080	370.9091	3298.269
Exp-9	11	3954.367	359.4879	3816.674
Exp-10	11	4023.333	365.7576	3702.602

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Hours	20830274	10	2083027	1.337243	0.223147	1.937567
Experiments	2E+08	9	22170351	14.23272	5.14E-14	1.985595
Error	1.4E+08	90	1557703			

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า TN ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินสูตร 3 (0.5cm)

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Exp-1	6	496.0424	82.67374	237.5338
Exp-2	6	428.8425	71.47375	150.6517
Exp-3	6	428.491	71.41516	100.4846
Exp-4	6	442.9039	73.81731	100.6985
hr-1	4	211.4677	52.86693	7.139688
hr-3	4	279.493	69.87326	26.05703
hr-6	4	311.0253	77.75634	33.179
hr-9	4	326.7	81.675	40.18174
hr-12	4	332.8764	83.21909	48.02656
hr-24	4	334.7173	83.67933	50.57984

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Experiments	512.8465	3	170.9488	24.98154	4.39E-06	3.287382
Hours	2844.198	5	568.8396	83.12714	2.16E-10	2.901295
Error	102.6451	15	6.843007			
Total	3459.69	23				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า TN ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินสูตร 3 (1.0 cm)

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Exp-1	6	318.8326	53.13877	93.01557
Exp-2	6	310.052	51.67534	322.0397
Exp-3	6	381.9953	63.66588	108.8215
Exp-4	6	395.2608	65.8768	323.1505
hr-1	4	135.3688	33.84221	77.00446
hr-3	4	206.4996	51.6249	76.51638
hr-6	4	242.8175	60.70437	86.85485
hr-9	4	265.6424	66.41061	66.81783
hr-12	4	276.0612	69.0153	65.82145
hr-24	4	279.7512	69.93781	66.06779

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Experimnets	938.3433	3	312.7811	12.3823	0.000245	3.287382
Hours	3856.231	5	771.2463	30.53191	2.36E-07	2.901295
Error	378.9051	15	25.26034			
Total	5173.48	23				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า TN ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินสูตร 6 (0.5cm)

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Exp-1	6	351.0879	58.51466	148.6827
Exp-2	6	353.3269	58.88781	73.86818
Exp-3	6	449.2455	74.87425	112.2481
Exp-4	6	345.2477	57.54128	89.69354
hr-1	4	175.5266	43.88164	67.85312
hr-3	4	231.8769	57.96922	66.09178
hr-6	4	257.4852	64.3713	71.53193
hr-9	4	272.3748	68.0937	74.19873
hr-12	4	279.719	69.92974	73.73462
hr-24	4	281.9256	70.48141	72.87232

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Experimnets	1239.801	3	413.267	158.7597	1.38E-11	3.287382
Hours	2083.416	5	416.6832	160.072	1.84E-12	2.901295
Error	39.04648	15	2.603098			
Total	3362.263	23				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ ค่า TN ในน้ำชะภายใต้สภาวะการชะล้างของเม็ดลูกดินสูตร 6 (1.0 cm)

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Exp-1	6	301.0996	50.18326	156.0198
Exp-2	6	306.7921	51.13201	198.3009
Exp-3	6	382.7041	63.78401	227.678
Exp-4	6	312.8933	52.14889	115.4418
hr-1	4	122.1868	30.54671	18.94878
hr-3	4	193.1265	48.28162	46.60339
hr-6	4	228.6837	57.17094	44.8311
hr-9	4	246.1588	61.53971	47.62651
hr-12	4	254.9473	63.73683	52.55476
hr-24	4	258.3858	64.59645	53.39656

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Experiments	729.3413	3	243.1138	58.3082	1.68E-08	3.287382
Hours	3424.661	5	684.9322	164.2735	1.52E-12	2.901295
Error	62.54192	15	4.169461			
Total	4216.544	23				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Moisture content ในดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week0	6	63.667	10.61117	1.585436
week1	6	70.23044	11.70507	3.369524
week2	6	67.36022	11.2267	2.886511
week3	6	67.2425	11.20708	3.131053
week4	6	67.53244	11.25541	2.379612
Exp-1	5	57.3622	11.47244	1.098868
Exp-2	5	52.76962	10.55392	0.065619
Exp-3	5	52.97524	10.59505	0.218913
Exp-4	5	55.1539	11.03078	0.065957
Exp-5	5	70.54721	14.10944	0.41308
Exp-6	5	47.22442	9.444885	0.196815

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	3.633902	4	0.908476	3.947225	0.016075	2.866081
Experimnets	62.15756	5	12.43151	54.01353	6.25E-11	2.71089
Error	4.60311	20	0.230156			
Total	70.39458	29				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Moisture content ในดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week2	4	43.93897	10.98474	0.088785
week3	4	43.8469	10.96172	0.066515
week4	4	44.31266	11.07816	0.267727
Exp-1	3	34.29297	11.43099	0.085018
Exp-2	3	32.01203	10.67068	0.017036
Exp-3	3	32.55044	10.85015	0.020538
Exp-4	3	33.24309	11.08103	0.042718

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	0.030421	2	0.01521	0.304008	0.748584	5.143253
Experimnets	0.968879	3	0.32296	6.454916	0.02625	4.757063
Error	0.300199	6	0.050033			
Total	1.299499	11				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Moisture content ในดิน

	<i>Exp3</i>	<i>Exp1</i>
Mean	10.85014568	11.43099038
Variance	0.020538033	0.085017623
Observations	3	3
Pearson Correlation	0.549386753	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	-4.119501173	
P(T<=t) one-tail	0.027090922	
t Critical one-tail	2.91998558	
P(T<=t) two-tail	0.054181843	
t Critical two-tail	4.30265273	

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Moisture content ในดิน

	<i>Exp4</i>	<i>Exp2</i>
Mean	11.08102918	10.67067541
Variance	0.042718339	0.017035954
Observations	3	3
Pearson Correlation	0.081158644	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	2	
t Stat	3.020370704	
P(T<=t) one-tail	0.04717924	
t Critical one-tail	2.91998558	
P(T<=t) two-tail	0.094358481	
t Critical two-tail	4.30265273	

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ pH ในดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week0	5	22.51333	4.502667	0.014547
week1	5	43.05667	8.611333	0.005098
week2	5	42.20667	8.441333	0.010392
week3	5	43.06333	8.612667	0.004163
week4	5	43.21333	8.642667	0.000686
Exp-1	5	38.88	7.776	3.349247
Exp-2	5	38.80333	7.760667	3.281519
Exp-3	5	38.83333	7.766667	3.393722
Exp-4	5	38.64	7.728	3.611131
Exp-5	5	38.89667	7.779333	3.028824

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	66.52661	4	16.63165	2028.828	2.02E-21	3.006917
Experimnets	0.00838	4	0.002095	0.255547	0.902021	3.006917
Error	0.131163	16	0.008198			
Total	66.66615	24				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Ammonium-N ในดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week1	5	1442	288.4	669.3
week2	5	1407	281.4	59.3
week3	5	1331	266.2	159.2
week4	5	1275	255	236.5
Exp-1	4	1149	287.25	430.25
Exp-2	4	1077	269.25	160.25
Exp-3	4	1141	285.25	374.25
Exp-4	4	1054	263.5	387
Exp-5	4	1034	258.5	387

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	3388.55	3	1129.517	7.415987	0.004537	3.490295
Experimnets	2669.5	4	667.375	4.381737	0.020554	3.259167
Error	1827.7	12	152.3083			
Total	7885.75	19				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Ammonium-N ในดิน

	<i>Exp1</i>	<i>Exp3</i>
Mean	287.25	285.25
Variance	430.25	374.25
Observations	4	4
Pearson Correlation	0.989971203	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	3	
t Stat	1.264911064	
P(T<=t) one-tail	0.147614468	
t Critical one-tail	2.353363435	
P(T<=t) two-tail	0.295228936	
t Critical two-tail	3.182446305	

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Ammonium-N ในดิน

	<i>Exp1</i>	<i>Exp2</i>
Mean	230.506	216.074
Variance	16422.09518	14258.62238
Observations	5	5
Pearson Correlation	0.997687301	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	4	
t Stat	2.660276543	
P(T<=t) one-tail	0.028187052	
t Critical one-tail	2.131846782	
P(T<=t) two-tail	0.056374105	
t Critical two-tail	2.776445105	

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Nitrate-N ในดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week0	6	11.37333	1.895556	0.066412
week1	6	11.84333	1.973889	0.138344
week2	6	11.59	1.931667	0.051737
week3	6	10.43667	1.739444	0.050042
week4	6	10.56333	1.760556	0.096566
Exp-1	5	8.49	1.698	0.016703
Exp-2	5	9.406667	1.881333	0.070453
Exp-3	5	8.4	1.68	0.032706
Exp-4	5	9.746667	1.949333	0.142408
Exp-5	5	10.03333	2.006667	0.077806
Exp-6	5	9.73	1.946	0.109508

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	0.262761	4	0.06569	0.855582	0.507149	2.866081
Experimnets	0.479932	5	0.095986	1.250171	0.323422	2.71089
Error	1.535572	20	0.076779			
Total	2.278265	29				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Organic matter (OM) ในดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week0	6	13.44	2.24	0
week4	6	12.75	2.125	0.03283
Exp-1	2	4.16	2.08	0.0512
Exp-2	2	4.44	2.22	0.0008
Exp-3	2	4.4	2.2	0.0032
Exp-4	2	4.27	2.135	0.02205
Exp-5	2	4.25	2.125	0.02645
Exp-6	2	4.67	2.335	0.01805

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	0.039675	1	0.039675	2.416997	0.180743	6.607891
Experimnets	0.082075	5	0.016415	1	0.5	5.050329
Error	0.082075	5	0.016415			
Total	0.203825	11				

ผลวิเคราะห์ค่าทางสถิติ Total-N ในเมล็ดลูกดิน

<i>SUMMARY</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
week1	4	0.914	0.2285	0.00667
week2	4	0.549	0.13725	0.000339
week3	4	0.537	0.13425	0.000245
week4	4	0.534	0.1335	0.000663
Exp-1	4	0.563	0.14075	4.89E-05
Exp-2	4	0.783	0.19575	0.005845
Exp-3	4	0.524	0.131	0.000611
Exp-4	4	0.664	0.166	0.006811

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
weeks	0.026258	3	0.008753	5.754497	0.017704	3.862548
Experimnets	0.01006	3	0.003353	2.204704	0.157087	3.862548
Error	0.013689	9	0.001521			
Total	0.050008	15				