

การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในข้าวขาวและข้าวกล้องด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีเหลว
สมรรถนะสูง-อินดักทีฟ คัปเปิล พลาสมา-แมสสเปกโตรเมทรี
ANALYSIS OF INORGANIC ARSENIC CONTENTS IN JASMINE RICE AND BROWN RICE
USING HIGH PERFORMANCE LIQUID CHROMATOGRAPHY-INDUCTIVELY COUPLE
PLASMA-MASS SPECTROMETRY (HPLC-ICP-MS)

สุนทรา เฟื่องฟุ้ง^{*†} กาญจนา พิศาภาค¹ จุตามาศ เทพคเชนทร์¹
Suntara Fueangfung^{*†}, Kanjana Pisapak¹, Jutamas Thepkhachen¹

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹ Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

* E-mail ผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding Author): Suntara.f@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างข้าวขาวจำนวน 19 ตัวอย่าง และตัวอย่างข้าวกล้องจำนวน 36 ตัวอย่าง ตัวอย่างข้าวนำมาย่อยด้วย 0.15 M HNO₃ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนได้สารละลายใส จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำการแยกชนิดของสารหนูอนินทรีย์ โดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง และวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ด้วยเทคนิคอินดักทีฟ คัปเปิล พลาสมา-แมสสเปกโตรเมทรี พบว่าในตัวอย่างข้าวขาวมีการปนเปื้อนสารหนูอนินทรีย์ในช่วง 0.03 ถึง 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย 0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในตัวอย่างข้าวกล้องมีการปนเปื้อนสารหนูอนินทรีย์ในช่วง ไม่พบ (ND) ถึง 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมาตรฐาน Codex ได้กำหนดค่าสารหนูอนินทรีย์ในข้าวขาวและข้าวกล้องไม่เกิน 0.20 และ 0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างข้าวขาวและตัวอย่างข้าวกล้องที่ตรวจพบมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานสากล

คำสำคัญ: สารหนูอนินทรีย์, ข้าวขาว, ข้าวกล้อง, โครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง-อินดักทีฟ คัปเปิล พลาสมา-แมสสเปกโตรเมทรี

ABSTRACT

This research was aimed to determine inorganic arsenic contents in 19 white rice samples and 36 brown rice samples. All samples were digested with 0.15 M HNO₃ at 100°C for 2 hours to obtain clear solution. The inorganic forms of arsenic (Arsenite, As(III), and Arsenate, As(V)) in the solution were separated using High Performance Liquid Chromatography (HPLC), then analyzed using Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS). The results were found that the

วันที่รับบทความ 22 สิงหาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 24 พฤษภาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 24 มิถุนายน 2565

white rice samples contained 0.03 to 0.17 mg/kg of inorganic arsenic contents. The average of inorganic arsenic contents of white rice samples was 0.08 mg/kg. The brown rice samples contained not detected (ND) to 0.25 mg/kg of inorganic arsenic contents. The average of inorganic arsenic contents of brown rice samples was 0.12 mg/kg. The Codex standards regulate inorganic arsenic contents of white rice and brown rice no more than 0.20 mg/kg and 0.35 mg/kg, respectively. Therefore, inorganic arsenic contents in the white rice samples and the brown rice samples were less than those of the standard.

Keywords: Inorganic Arsenic, White rice, Brown rice, HPLC-ICP-MS

1. บทนำ

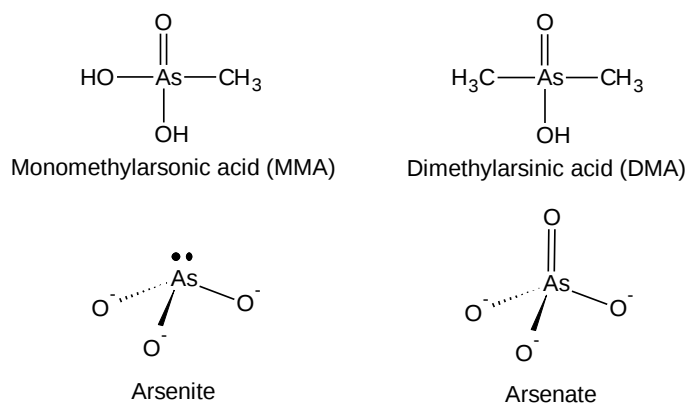
สารหนู (Arsenic, As) เป็นธาตุกึ่งโลหะที่มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั้งที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติหรืออาจเกิดจากการกระทำของมนุษย์ สารหนูก่อให้เกิดโทษต่อร่างกายมนุษย์มากที่สุดจากการจัดอันดับของ The ATSDR 2019 Substance Priority List [1] ซึ่งสารหนูพบได้ทั้งในรูปของสารหนูอินทรีย์และสารหนูอนินทรีย์ โดยสารหนูอนินทรีย์มีความเป็นพิษสูงกว่าสารหนูอินทรีย์ [2] ในปัจจุบันการปนเปื้อนสารหนูในพืชเศรษฐกิจมีอยู่เป็นจำนวนมากโดยเฉพาะข้าวซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับต้นของโลกในต้นปี 2563 [3] โดยการปนเปื้อนนี้อาจมาจากหลายสาเหตุ เช่น แหล่งดินที่ใช้ในการเพาะปลูก น้ำ ปุ๋ย สารเร่งการเจริญเติบโตของพืช และสารปราบศัตรูพืชที่ใช้ในการเกษตร ปัจจุบันหลายประเทศให้ความสำคัญกับการปนเปื้อนสารหนูในข้าว และมาตรฐานสากล (Codex) ได้มีการกำหนดค่าปริมาณปนเปื้อนสูงสุด (Maximum Level, ML) ของสารหนูอนินทรีย์ ซึ่งความเป็นพิษที่รุนแรงต่อมนุษย์มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารหนูในรูปแบบอื่น ซึ่ง Codex กำหนดไว้ไม่เกิน 0.20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในข้าวขาว และกำหนดค่าปริมาณปนเปื้อนสูงสุดสารหนูอนินทรีย์ไม่เกิน 0.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในข้าวกล้อง [4] สำหรับประเทศคู่ค้าอื่นๆ ก็มีการกำหนดมาตรฐานด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่นสหภาพยุโรป (European Union, EU) มีการกำหนดค่า ML ของสารหนูอนินทรีย์ในข้าวขัดสี 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนข้าวกล้องที่ 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [5] และสาธารณรัฐประชาชนจีนกำหนดค่าที่เรียกว่า Maximum Contaminant Level (MCL) โดยข้าวขัดสีกำหนดให้มีค่า MCL ของสารหนูไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และข้าวกล้องมีค่า MCL ของสารหนูไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [6] จากค่ามาตรฐานดังกล่าว ทำให้การวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของสารหนู (Arsenic Speciation) ในข้าวจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาคุณภาพของข้าวที่ผลิตให้อยู่ในมาตรฐานที่ปลอดภัย สร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค และสามารถส่งออกไปยังประเทศคู่ค้าได้ จากความสำคัญดังกล่าว นำไปสู่การทำงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ 1) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวขาวและตัวอย่างข้าวกล้องที่จำหน่ายภายในประเทศด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง-อินดักทีฟ คัปเปิล พลาสมา-แมสสเปกโตรเมทรี (High Performance Liquid Chromatography-Inductively Couple Plasma-Mass Spectrometry, HPLC-ICP-MS) 2) ตรวจสอบความปลอดภัยของตัวอย่างข้าวโดยเปรียบเทียบปริมาณสารหนูอนินทรีย์ที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างกับ Codex

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้าว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่า *Oryza sativa* L. เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้าที่มีใบเลี้ยงเดี่ยว แบ่งออกเป็นสองสายพันธุ์หลัก [7] ได้แก่ *Oryza glaberrima* เป็นสายพันธุ์ที่นิยมปลูกในทวีปแอฟริกา ส่วนอีกสายพันธุ์คือ *Oryza sativa* เป็นสายพันธุ์ที่นิยมปลูกทั่วโลก ซึ่งลักษณะของ *Oryza sativa* [8] มีลำต้นสีเขียวเป็นข้อและปล้องกลวง สามารถเจริญเติบโตโดยการแตกกอ ลักษณะรากเป็นฝอยที่สามารถยึดให้ลำต้นอยู่ในดินได้เป็นอย่างดี ข้าวออกดอกเป็นข้อสีขาว เมื่อกลายเป็นผลข้าว มีลักษณะเป็นเมล็ดแข็งทรงรีอยู่ภายในข้อที่เป็นรวงข้าว มีเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด โดยเปลือกหุ้มเมล็ดของต้นอ่อนจะเป็นสีเขียว เมื่อโตเต็มที่ลำต้นจะแห้งเป็นสีน้ำตาล และเปลือกหุ้มเมล็ดจะเป็นสีเหลืองทอง โดย *Oryza sativa* มีสายพันธุ์แยกย่อยไปอีก ได้แก่ Javanica, Japonica ซึ่งเพาะปลูกกันมากในเขตตอนบน และ indica เป็นสายพันธุ์ที่ปลูกกันมากในเขตร้อนรวมทั้งประเทศไทย [9] ข้าวสายพันธุ์ indica ในประเทศไทยยังแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ซึ่งในอดีตและปัจจุบันได้มีการปรับปรุงสายพันธุ์ข้าวอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ข้าวที่ทนต่อสภาพอากาศ ทนต่อโรค มีเอกลักษณ์และกลิ่นหอมเฉพาะตัว ซึ่งข้าวหอมมะลิ (Jasmine rice) เป็นพันธุ์ข้าวไทยที่มีชื่อเสียงระดับโลกทั้งในเรื่องของกลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางอาหาร

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทยที่นอกจากจะบริโภคในรูปของอาหารคาวหวานแล้ว ข้าวสามารถนำมาแปรรูปเป็นแป้ง เส้นก๋วยเตี๋ยวเพื่ออาหารที่รับประทานมีความหลากหลาย ข้าวขาวมีคุณค่าทางโภชนาการหลายด้าน [10] ได้แก่ เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นแหล่งของโปรตีน ไขมัน วิตามินเอ วิตามินบี วิตามินซี และแร่ธาตุ ช่วยให้พลังงานและบำรุงร่างกาย เสริมสร้างการทำงานต่อระบบประสาทและสมอง มีส่วนช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ ชะลอความแก่และป้องกันโรคที่เกิดจากการเสื่อมของอวัยวะ สารสกัดจากข้าวมาเป็นส่วนผสมของเครื่องสำอาง [11] นอกจากนี้ส่วนอื่นของข้าวยังสามารถมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีกด้วย [12] เช่น รำข้าวใช้ในการผลิตน้ำมันรำข้าวและเป็นอาหารสัตว์ ฟางข้าวนำมาใช้ในการ เลี้ยงสัตว์ เพาะเห็ด เป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ย แกลบเป็นส่วนประกอบในการทำเครื่องปั้นดินเผา กระดาษ ถ่านเชื้อเพลิง เป็นต้น ในปัจจุบันกับกระแสสุขภาพที่มาแรงข้าวหอมมะลิที่นิยมบริโภคจะเป็นข้าวที่มีการขัดสีน้อยลงเช่น ข้าวกล้อง ข้าวซ้อมมือ ฯลฯ [13] ซึ่งยังคงมีส่วนประกอบสำคัญที่ให้คุณประโยชน์มากกว่าข้าวขาว ได้แก่ จมูกข้าวและรำข้าว เป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยวิตามินและแร่ธาตุเพิ่มเติมหลายชนิด เช่น วิตามินอี ธาตุเหล็ก เบต้า-แคโรทีน และ แกมมา-โอไรซานอล (gamma-oryzanol) เป็นต้น [12]

สารหนู หรือ อาร์เซนิก (Arsenic) เป็นธาตุกึ่งโลหะหมู่ 5A กลุ่มธาตุเรพรีเซนเททีฟของตารางธาตุ มีเลขอะตอมเท่ากับ 33 มีเลขมวลเท่ากับ 75 สารหนูพบได้ทั้งในธรรมชาติและสารสังเคราะห์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารหนูอินทรีย์ (Organic Arsenic) และสารหนูอนินทรีย์ (Inorganic Arsenic) โดยที่สารหนูอินทรีย์ที่พบมากที่สุดในการปนเปื้อน คือ กรดมอนอเมทิลอาร์โซนิค (Monomethylarsonic acid, MMA) และกรดไดเมทิลอาร์โซนิค (Dimethylarsinic acid, DMA) ส่วนรูปแบบสารหนูอนินทรีย์ที่พบมากที่สุดคืออาร์เซไนต์ (Arsenite, As(III)) และอาร์เซเนต (Arsenate, As(V)) โครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งสารหนูอนินทรีย์มีความเป็นพิษสูงกว่าสารหนูอินทรีย์ [14,15] โดยสารหนูอาร์เซไนต์มีความเป็นพิษสูงกว่าสารหนูอาร์เซเนต 2-10 เท่า สารหนูอนินทรีย์ดังกล่าวพบมากในแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งทางการเกษตรที่มีการใช้สารเคมีปราบศัตรูพืช และพื้นที่ใกล้กับเหมืองที่มีการถลุงแร่ [16] ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเหตุผลในการกำหนดค่าปริมาณสารหนูอนินทรีย์เพื่อเป็นมาตรฐานในการตรวจสอบความปลอดภัยของข้าวในเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 1 โครงสร้างกรดมอนอเอทิลอาร์โซนิค (Monomethylarsonic acid, MMA), กรดไดเมทิลอาร์โซนิค (Dimethylarsinic acid, DMA), อาร์เซไนต์ (Arsenite), และอาร์เซเนต (Arsenate)

สารหนูพบในข้าวขาวและข้าวกล้องในปริมาณที่ไม่เท่ากัน โดยข้าวกล้องจะมีโอกาสพบสารหนูมากกว่าข้าวขาว เนื่องจากการสารหนูที่ปนเปื้อนจะไปสะสมในชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดของข้าวที่มีสีน้ำตาลและจมูกข้าว ส่วนข้าวขาวที่มีผ่านกระบวนการเอาเยื่อหุ้มเมล็ดและจมูกข้าวออก ทำให้มีความเสี่ยงต่อการสะสมของปริมาณสารหนูน้อยกว่า [17] ซึ่งองค์การอนามัยโลกได้กำหนดปริมาณสารหนูอนินทรีย์ที่ยอมรับได้ในการบริโภคต่อสัปดาห์ (Provisional Tolerable Weekly Intake, PTWI) ไม่เกิน 15 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักร่างกายต่อสัปดาห์ หรือ ไม่เกิน 2.1 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักร่างกายต่อวัน [18] อย่างไรก็ตามเมื่อสารหนูเข้าไปในร่างกายทั้งโดยการกิน การหายใจ หรือสัมผัสสารเข้าไปจะเป็นอันตรายระบบทางเดินอาหารและส่วนต่าง ๆ ของร่างกายตามปริมาณและระยะเวลาที่ได้รับเข้าไป ในกรณีที่ได้รับในปริมาณน้อยและเป็นเวลานานอาจทำให้เกิดอาการเรื้อรัง คือ ผิวหนังเปลี่ยนสีมีสีเข้มขึ้นและอ่อนลงเป็นจุดทั่วร่างกาย เกิดภาวะเลือดจาง ความดันโลหิตสูง มีอาการปวดศีรษะ เวียนศีรษะ ขาดสมาธิ มือปลายเท้า และอาจก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง มะเร็งปอด มะเร็งไต ถ้ารับในปริมาณมากอาจเกิดอาการเฉียบพลัน ได้แก่ อาการปวดท้องอย่างรุนแรง คลื่นไส้ อาเจียน ถ่ายเป็นน้ำ ปวดศีรษะ เวียนศีรษะ ชักและเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิต [19]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิควิเคราะห์ปริมาณสารหนูในตัวอย่างนั้นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของสารหนูและปริมาณที่ต้องการทราบในการวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดของข้าวกล้องในเขตมณฑลไหนาน ประเทศจีน จำนวน 282 ตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry (HG-AFS) [20] การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูทั้งหมดและสารหนูอนินทรีย์ของข้าวดิบและข้าวหุงสุกจำนวน 39 ตัวอย่างที่จำหน่ายในประเทศฝรั่งเศส โดยใช้เทคนิค Hydride generation atomic absorption spectroscopy (HG-AAS) [21] การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในผลิตภัณฑ์ที่ทำจากข้าว โดยใช้เทคนิค HG-AAS [22] การวิเคราะห์ปริมาณสารหนูในข้าว โดยใช้เทคนิค Capillary Electrophoresis/Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (CE/ICP-MS) [23] แต่ในปัจจุบันเทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูที่นิยมใช้มากที่สุดคือเทคนิคโครมาโทกราฟีเหลวสมรรถนะสูง-อินดักทีฟ คัปเปิลพลาสมา-แมสสเปกโตรเมทรี (High Performance Liquid Chromatography-Inductively Couple Plasma-Mass Spectrometry, HPLC-ICP-MS) ซึ่งจากเทคนิคดังกล่าวสามารถแยกชนิดสารหนูอนินทรีย์และสารหนูอนินทรีย์รวมทั้งวิเคราะห์ในสารหนูในปริมาณต่ำได้ [24,25,26,27]

3. วิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Sartorius, Germany) เครื่องดูด-จ่ายสารละลายอัตโนมัติชนิดปรับปริมาตร (Eppendorf, Germany) เครื่องปั่นตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Foss Tecator, Denmark) เครื่องวัดค่า pH (Agilent, USA) อ่างควบคุมอุณหภูมิ (T. J. Instrument) เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอน (Thermo Fisher Scientific, USA) เครื่องแก้วแผ่นกรองชนิดไนลอน ขนาดรู 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ใช้สำหรับกรองสารละลายมาตรฐาน ตัวอย่างและตัวอย่างที่ละลายเคลื่อนที่ สำหรับเครื่อง HPLC เป็นรุ่น Altus A-10 ของบริษัท PerkinElmer ประเทศสหรัฐอเมริกา ประกอบด้วยปั๊มความดันสูงสำหรับตัวอย่าง (Pump) ระบบฉีดสารอัตโนมัติ (Autosampler) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ (Thermostat column compartment) สำหรับเครื่อง ICP-MS เป็นรุ่น NexION3500 ของบริษัท PerkinElmer ประเทศสหรัฐอเมริกา และคอมพิวเตอร์ประมวลผล สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่ น้ำกลั่นปราศจากไอออน (doubled deionized water) ที่วัดค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 18.2 เมกะโห์มต่อเซนติเมตร กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3 , Sigma-Aldrich, reagent grade 70%) โซเดียม 1-บิวเทนซัลโฟเนต (sodium 1-butanedisulfonate, $\text{C}_4\text{H}_9\text{NaO}_3\text{S}$, Sigma-Aldrich, 98%) เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethylammonium hydroxide, $(\text{CH}_3)_4\text{N}(\text{OH})$, Sigma-Aldrich, ACS reagent) กรดมาโลนิค (malonic acid, $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, Sigma-Aldrich, ReagentPlus®, 99%) และเมทานอล (methanol, CH_3OH , RCI Labscan, HPLC grade) สารมาตรฐาน As(III) (Sodium (meta)arsenite, NaAsO_2 , Sigma-Aldrich, $\geq 90\%$) สารมาตรฐาน As(V) (Sodium arsenate dibasic heptahydrate, $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 98\%$)

3.2 การเตรียมตัวอย่างข้าวขาวและข้าวกล้อง

นำตัวอย่างข้าวขาวจำนวน 19 ตัวอย่างและตัวอย่างข้าวกล้องจำนวน 36 ตัวอย่าง ไปบดด้วยเครื่องบดข้าว จากนั้นนำมาน้ำปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นข้าว แล้วเก็บใส่ถุงซิปล็อก ปิดให้สนิทแล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น 24 ชั่วโมง ซึ่งตัวอย่างข้าว 0.5 กรัม ใส่ลงในหลอดทดลอง นำมาเติมกรดไนตริก 0.15 mol/L ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปิดฝาภาชนะบรรจุตัวอย่าง นำไปเขย่าด้วยเครื่อง vortex แล้วนำไปต้มใน Water bath ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ดูดส่วนที่เป็นสารละลายใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร ขั้นตอนเติมน้ำกลั่นและปั่นเหวี่ยงให้ทำซ้ำอีกสองครั้ง จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน นำไปกรองด้วย Nylon filter ขนาด 0.45 ไมครอนใส่ลงในขวด vial นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-ICP-MS

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์

1) การทดสอบความเป็นเส้นตรง

เตรียมสารละลายมาตรฐาน As(III) และ As(V) ที่ความเข้มข้น 0, 1, 2, 5, 10, 20 ไมโครกรัมต่อลิตร นำไปกรองด้วย Nylon filter ขนาด 0.45 ไมครอน วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-ICP-MS ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดัดแปลงจาก Matsumoto และคณะ [26] และ Nookabkaew และคณะ [28] แสดงดังตารางที่ 1 นำค่าที่ได้มา

สร้างกราฟมาตรฐานแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่า intensity และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: r^2)

ตารางที่ 1 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สารหนูอนินทรีย์ด้วยเครื่อง HPLC-ICP-MS

สภาวะที่ใช้ใน HPLC	
พารามิเตอร์	สภาวะที่ใช้
Column	C18, particle size 5 μ m, 4.6 mm x 250 mm
Mobile phase	10 mM sodium 1-butanedisulfonate 4 mM tetramethylammonium hydroxide 4 mM malonic acid, 0.05% methanol (ปรับ pH 3.0 โดยใช้ conc. HNO_3)
Flow rate	0.75 mL/min
Column Temperature	25 $^{\circ}\text{C}$
Injection volume	20 μ L
สภาวะที่ใช้ใน ICP-MS	
พารามิเตอร์	สภาวะที่ใช้
RF power	1.6 kW
Ar Plasma gas flow rate	18 L/min
Ar Carrier gas flow rate	0.70 L/min
Ar Auxiliary gas flow rate	0.90 L/min
Ar Make up gas flow rate	0.43 L/min
Mass (m/z)	^{75}As
Dwell time	0.5 s

2) การศึกษาหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) ขีดจำกัดของการวัดปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

ศึกษาการหา LOD และ LOQ จากสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1 โดยการนำสารมาตรฐาน As(III) และ As(V) ความเข้มข้นต่ำมาวิเคราะห์ โดยทำการเจือจางสารละลายมาตรฐาน และทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ การหาค่า LOD และ LOQ พิจารณาจากความเข้มข้นที่ให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณของสารที่วัดได้และสัญญาณรบกวน (S/N) เท่ากับ 3 และ 10 ตามลำดับ

3) การศึกษาความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ (Precision)

นำสารละลายมาตรฐาน As(III) และ As(V) ที่ความเข้มข้น 1, 2, และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่าความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ภายในวันเดียวกัน ในรูปของร้อยละการเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) และความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร ในการหาค่าความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ระหว่างวัน โดยแสดงค่าในรูปของ %RSD

4) การศึกษาร้อยละการกลับคืน (Percent Recovery)

ศึกษาร้อยละการกลับคืน โดยนำสารละลายมาตรฐาน As(III) และ As(V) ลงในตัวอย่างให้มีความเข้มข้น 2, 5, และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร นำไปกรองด้วย Nylon filter ขนาด 0.45 ไมครอนใส่ลงในขวด vial จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณ คำนวณค่าร้อยละการกลับคืนของแต่ละระดับความเข้มข้น

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่างข้าวขาวและข้าวกล้อง

วิธีการวิเคราะห์สารหนูอนินทรีย์จากตัวอย่างข้าวขาว 19 ตัวอย่าง และตัวอย่างข้าวกล้อง 36 ตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ นำค่าที่ได้ไปหาปริมาณสารหนูอนินทรีย์เทียบกับกราฟมาตรฐาน

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์สารหนูอนินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 2 ความเป็นเส้นตรงของสารมาตรฐาน As(III) และ As(V) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสนใจ 0.9994 และ 0.9989 ตามลำดับ แสดงว่ากราฟมาตรฐานมีความเป็นเส้นตรงในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา พบว่าสารมาตรฐาน สำหรับค่า LOD และ LOQ ที่ได้จากการวิเคราะห์ As(III) เท่ากับ 0.006 และ 0.017 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Matsumoto และคณะ [26] จากการพิจารณาร้อยละเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ของความเที่ยงภายในวันเดียวกัน และความเที่ยงระหว่างวัน พบว่าความเข้มข้นมีค่าน้อยกว่า 4.70% ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สอดคล้องกับเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน AOAC SMPR 2015.006 [29] สำหรับค่าเฉลี่ยร้อยละการกลับคืนในการวิเคราะห์โดยเติมสารมาตรฐาน As(III) และ As(V) ที่ทราบความเข้มข้นลงไปตัวอย่างให้มีความเข้มข้น 2, 5, และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตรแล้วคำนวณความเข้มข้นที่ได้หลังการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยร้อยละการกลับคืนของสารอยู่ในช่วงค่าที่ยอมรับได้ทุกระดับความเข้มข้นที่ศึกษาจากการตรวจสอบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์โดยพิจารณาได้จากพารามิเตอร์ดังกล่าว มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมในการหาปริมาณ As(III) และ As(V)

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์สารหนูอนินทรีย์ ด้วยเครื่อง HPLC-ICP-MS

ประเภทของสารหนูอนินทรีย์	พารามิเตอร์	ผลการศึกษา
As(III)	ความเป็นเส้นตรง	$y = 0.0036x + 0.0004$
	Coefficient of determination (r^2)	0.9994
	ความเที่ยงภายในวันเดียวกัน (n = 5)	%RSD = 4.54 (ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อลิตร) %RSD = 2.70 (ความเข้มข้น 2 ไมโครกรัมต่อลิตร) %RSD = 1.88 (ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร)
	ความเที่ยงระหว่างวัน (n = 5, 5 days)	%RSD = 3.47 (ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร)
	ค่าเฉลี่ยร้อยละการกลับคืน	88.24 ± 4.15 (ความเข้มข้น 2 ไมโครกรัมต่อลิตร) 89.33 ± 4.50 (ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร) 90.53 ± 3.89 (ความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร)
As(V)	ความเป็นเส้นตรง	$y = 0.0023x + 0.0003$
	Coefficient of determination (r^2)	0.9989
	ความเที่ยงภายในวันเดียวกัน (n = 5)	%RSD = 4.36 (ความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อลิตร) %RSD = 2.27 (ความเข้มข้น 2 ไมโครกรัมต่อลิตร) %RSD = 1.45 (ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร)
	ความเที่ยงระหว่างวัน (n = 5, 5 days)	%RSD = 3.70 (ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร)
	ค่าเฉลี่ยร้อยละการกลับคืน	89.42 ± 4.34 (ความเข้มข้น 2 ไมโครกรัมต่อลิตร) 90.38 ± 3.70 (ความเข้มข้น 5 ไมโครกรัมต่อลิตร) 93.74 ± 4.22 (ความเข้มข้น 20 ไมโครกรัมต่อลิตร)
	ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD)	0.006 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
	ขีดจำกัดของการวัดปริมาณ (LOQ)	0.017 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

4.2 ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ที่พบในตัวอย่างข้าวขาว

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างข้าวขาวจำนวน 19 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณสารหนูอนินทรีย์ที่ตรวจพบอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย 0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนมากอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตัวอย่างข้าวขาวปริมาณสารหนูอนินทรีย์ต่ำสุดคือ ข้าวหอมตราฉัตรอรุณ (0.03 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ตัวอย่างข้าวขาวที่มีปริมาณสารหนูอนินทรีย์สูงสุดคือ ข้าว กข 43 (0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งปริมาณสารหนูอนินทรีย์ซึ่ง Codex ได้กำหนดค่าปริมาณปนเปื้อนสูงสุด (Maximum Level, ML) ของสารหนูอนินทรีย์ในข้าวขาวไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นตัวอย่างทั้งหมดไม่เกินค่ามาตรฐานปลอดภัยต่อผู้บริโภคและสามารถส่งออกได้

ตารางที่ 3 ปริมาณสารหนูนินทรีย์ที่พบในตัวอย่างข้าวขาว

ลำดับ	ตัวอย่าง/ผลิตภัณฑ์	ปริมาณสารหนูนินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	มาตรฐาน Codex (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไม่เกินค่ามาตรฐาน Codex
1	ข้าว กข 43	0.12	0.2	✓
2	ข้าวหอมมะลิ	0.08	0.2	✓
3	ข้าวหอมมะลิคัดพิเศษ	0.04	0.2	✓
4	ข้าวขาวหอมมะลิ 100%	0.08	0.2	✓
5	ข้าวขาวหอมมะลิ 100%	0.08	0.2	✓
6	ข้าวหอมปทุมธานี	0.09	0.2	✓
7	ข้าวขาว 5 % เมื่องลับแล	0.04	0.2	✓
8	ข้าวหอมปทุมอุตรดิตถ์	0.05	0.2	✓
9	ข้าวหอมมะลิเต็มวิตามิน	0.04	0.2	✓
10	ข้าวหอม ตราฉัตรอรุณ	0.03	0.2	✓
11	ข้าวเสาไห้ ตราปิ่นเงิน	0.06	0.2	✓
12	ข้าวขาว 15 % พนมรุ้ง	0.06	0.2	✓
13	ข้าวขาว ตราหรั่ง 100 %	0.06	0.2	✓
14	ข้าวขาวคัดพิเศษ 100 %	0.05	0.2	✓
15	ข้าวขาวหอมมะลิ 100%	0.08	0.2	✓
16	ข้าว กข 43	0.17	0.2	✓
17	ข้าวหอมเบญจเพชรบุระ	0.16	0.2	✓
18	ข้าวหอมปทุมธานี	0.12	0.2	✓
19	ข้าวหอมมะลิ 100 %	0.09	0.2	✓
ปริมาณสารหนูนินทรีย์เฉลี่ย		0.08		

4.3 ปริมาณสารหนูนินทรีย์ที่พบในตัวอย่างข้าวกล้อง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูนินทรีย์ในตัวอย่างข้าวกล้องจำนวน 36 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าปริมาณสารหนูนินทรีย์อยู่ช่วง ไม่พบ (Not Detected, ND) ถึง 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนมากอยู่ในช่วง 0.10 ถึง 0.15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งช่วงและค่าเฉลี่ยปริมาณสารหนูนินทรีย์สูงกว่าข้าวขาว สอดคล้องกับคำอธิบายในงานวิจัยของ Xu และคณะ (2008) ที่กล่าวว่าสารหนูนินทรีย์ที่ต้นข้าวได้รับจากพื้นที่เพาะปลูกและน้ำเกิดการสะสมที่เยื่อหุ้มเมล็ดข้าวมากที่สุด [30] ตัวอย่างข้าวกล้องปริมาณสารหนูนินทรีย์ต่ำสุดคือ ข้าวเหนียวดำลิ้มผิวและข้าวพญาลิ้มแกง (ND) ตัวอย่างข้าวกล้องที่มีปริมาณสารหนูนินทรีย์สูงสุดคือ ข้าวสังข์หยดตัวอย่างลำดับที่ 20 (0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ สิริรัฐญา ผดุงอรุณและคณะ (2559) ที่พบปริมาณสารหนูนินทรีย์ในข้าวสังข์หยดสูงสุด 0.166 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นผลผลิตข้าวที่ปลูกกันมากในภาคใต้ ซึ่งข้อมูลที่ได้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาและแก้ปัญหา เพื่อควบคุมปริมาณสารหนูนินทรีย์ในแหล่งที่เพาะปลูกให้น้อยลง [31] อย่างไรก็ตามตัวอย่างข้าวกล้องทั้งหมดมีปริมาณสารหนูนินทรีย์ไม่เกินค่ามาตรฐาน Codex

ตารางที่ 4 ปริมาณสารหนูอินทรีย์ที่พบในตัวอย่างข้าวกล้อง

ลำดับ	ตัวอย่าง/ผลิตภัณฑ์	ปริมาณสารหนูอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	มาตรฐาน Codex (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไม่เกินค่ามาตรฐาน Codex
1	ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.12	0.35	✓
2	ข้าวหอมนิล	0.13	0.35	✓
3	ข้าวกล้องหอมมะลิ	0.14	0.35	✓
4	จมูกข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.11	0.35	✓
5	จมูกข้าวกล้อง	0.10	0.35	✓
6	ข้าวกล้องหอมมะลิ	0.11	0.35	✓
7	ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.16	0.35	✓
8	ข้าวกล้องงอก	0.14	0.35	✓
9	ข้าวกล้องหอมมะลิคัดพิเศษ	0.16	0.35	✓
10	ข้าวสังข์หยด	0.20	0.35	✓
11	ข้าวอินทรีย์บ้านดอกบัว	0.07	0.35	✓
12	ข้าวสามสี	0.13	0.35	✓
13	ข้าวเหนียวดำลิ้มผัว	Not Detected (ND)	0.35	✓
14	ข้าวกล้องหอมมะลิอินทรีย์	0.13	0.35	✓
15	ข้าวกล้องหอมมะลิพันธุ์	0.07	0.35	✓
16	ข้าวแดงดงตาล	0.06	0.35	✓
17	ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.07	0.35	✓
18	ข้าวกล้องหอมมะลิอินทรีย์	0.19	0.35	✓
19	ข้าวกล้องหอมมะลิ 100%	0.19	0.35	✓
20	ข้าวสังข์หยด	0.25	0.35	✓
21	ข้าวเหนียวดำลิ้มผัว	0.02	0.35	✓
22	ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.17	0.35	✓
23	ข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.18	0.35	✓
24	ข้าวกล้องหอมแดงอินทรีย์	0.09	0.35	✓
25	จมูกข้าวกล้องหอมมะลิ	0.17	0.35	✓
26	จมูกข้าวกล้อง	0.10	0.35	✓
27	จมูกข้าวไรซ์เบอร์รี่	0.12	0.35	✓
28	ข้าวหอมนิล	0.14	0.35	✓
29	ข้าวกล้องหอมมะลิแดง	0.17	0.35	✓
30	ข้าวกล้องดอยออร์แกนิก	0.12	0.35	✓
31	ข้าวกล้องใหม่	0.18	0.35	✓
32	ข้าวกล้องหอมมะลิ	0.14	0.35	✓
33	ข้าวพญาลิสมัง	Not Detected (ND)	0.35	✓
34	ข้าวกล้องงอก	0.16	0.35	✓
35	ข้าวกล้องหอมมะลิ	0.10	0.35	✓
36	ข้าวสังข์หยด	0.04	0.35	✓
ปริมาณสารหนูอินทรีย์เฉลี่ย		0.12		

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

การทดสอบหาปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในข้าวขาวและข้าวกล้อง จำนวนทั้งหมด 55 ตัวอย่างโดยวิธี HPLC-ICP-MS พบว่าปริมาณสารหนูอนินทรีย์ในตัวอย่างข้าวขาว 19 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง 0.03 ถึง 0.17 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย 0.08 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตัวอย่างข้าวกล้อง 36 ตัวอย่าง อยู่ในช่วง ไม่พบ ถึง 0.25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าเฉลี่ย 0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานสากล (Codex) ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ให้ผู้บริโภคภายในประเทศและต่างประเทศที่นำเข้าข้าวจากประเทศไทยว่าข้าวไทยปลอดภัยและได้มาตรฐาน เป็นแนวทางที่สำคัญต่อการตรวจสอบและวิเคราะห์โลหะหนักหรือสารปนเปื้อนในตัวอย่างข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวต่อไป

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณกองพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **ATSDR's Substance Priority List**. ASTDR, 2021.
- [2] Kuivenhoven. M, Mason. K. **Arsenic Toxicity**. StatPearls, 2021.
- [3] สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. **รายงานสถานการณ์ส่งออกและคาดการณ์แนวโน้มครึ่งปีหลังปี 2563, 2563**. สืบค้นจาก http://www.thairiceexporters.or.th/PR_news.htm
- [4] Food and Agriculture Organization of United Nations. **Codex Committee on Contaminants in Foods. (2014). Proposed Draft Maximum Levels for Arsenic in Rice (Raw and Polished Rice). CX/CF/14/8/6**. FAO, 2014.
- [5] European Commission. **Commission Regulation (EU) 2015/1006 of 25 June 2015 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of inorganic arsenic in foodstuffs (Text with EEA relevance)**. Publications Office of the EU, 2015.
- [6] Liao, N., Seto, E., Eskenazi, B., Wang, M., Li, Y., & Hua, J. **A Comprehensive Review of Arsenic Exposure and Risk from Rice and a Risk Assessment among a Cohort of Adolescents in Kunming, China**. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018 15(10), 2191, DOI:10.3390/ijerph15102191
- [7] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 3 เรื่องที่ 1 ข้าว. **แหล่งกำเนิดของข้าว**, ม.ป.ป.. สืบค้นจาก <http://saranukromthai.or.th>
- [8] กรมวิชาการเกษตร. **วิวัฒนาการพันธุ์ข้าวไทย**. สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, 2541.
- [9] สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. **ข้าว คือ ชีวิต**. ม.ป.ป., สืบค้นจาก <https://dna.kps.ku.ac.th/index.php/rsc-news/new-rsc-rgd/news/205-rice-for-life>
- [10] @thaifood.com. **พืชผักสมุนไพร ข้าว : Rice**. 2560, สืบค้นจาก <https://www.thai-thaifood.com/th/ข้าว>
- [11] สุนันท์ วิทิตสิริ. **ผลิตภัณฑ์จากข้าวไทยและผลพลอยได้ที่น่าสนใจ**. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2559.

- [12] ประสิทธิ์ วังภคพัฒน์วงศ์. โภชนาการของข้าวและนวัตกรรมการใช้ประโยชน์. วารสารคลินิกอาหารและโภชนาการ, 2553, 4(1), หน้า 32-40.
- [13] ศูนย์ข่าวกระทรวงพาณิชย์. ข้าวเพื่อสุขภาพไทย...กระแสบริบทในตลาดสิงคโปร์. 2561, สืบค้นจาก <https://www.moc.go.th/index.php>
- [14] Ng, J. C. **Environmental Contamination of Arsenic and Its Toxicological Impact on Humans**. Environmental Chemistry, 2005, 2(3), p.p. 146–160.
- [15] Meharg, A. A., and Hartley-Whitaker, J. **Arsenic Uptake and Metabolism in Arsenic Resistant and Non-resistant Plant Species**. New Phytologist, 2002, 154(1), p.p. 29–43.
- [16] สถาบันอาหาร กระทรวงอุตสาหกรรม. **โลหะหนัก: Arsenic**, 2563. สืบค้นจาก http://www.nfi.or.th/foodsafety/upload/damage/pdf/arsenic_2.pdf
- [17] Lai. P. Y., Kottingham. K. L., Steinmaus. C., Karagas. M. R., Miller. M. D. **Arsenic and Rice: Translating Research to Address Health Care Providers' Needs**. The Journal of Pediatrics, 2015, 167(4), p.p. 797–803.
- [18] Gomez-Camirero, A., Howe. P., Hughes. M., Kenyon. E., Lewis. D. R., Moore. M., Ng. J., Aitio. A., Becking. G. **Environmental Health Criteria 224: Arsenic and arsenic compounds**. World Health Organization, 2001.
- [19] วาทีณี ดรบุญล้น และคณะ. การศึกษาการได้รับสัมผัสสารหนูชนิดต่างๆ ของประชากรไทยในพื้นที่เสี่ยงสัมผัสสารหนู (รายงานประจำปี 2557 ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 7). ขอนแก่น: กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข, 2557.
- [20] Fu. Y., Chen. M., Bi. X., He. Y., Ren. L., Xiang. W., Qiao. S., Yan. S., Li. Z., Ma. Z. **Occurrence of Arsenic in Brown Rice and Its Relationship to Soil Properties from Hainan Island, China**. Environmental Pollution, 2011, 159(7), p.p. 1757-1762.
- [21] Torres-Escribano. S., Leal. M., Vélez. D., Montoro. R. **Total and Inorganic Arsenic Concentrations in Rice Sold in Spain, Effect of Cooking, and Risk Assessments**. Environmental Science and Technology, 2008, 42(10), p.p. 3867-3872.
- [22] Santos, G. M., Pozebon. D., Cerveira. C., De Moraes. D. P. **Inorganic Arsenic Speciation in Rice Products Using Selective Hydride Generation and Atomic Absorption Spectrometry (AAS)**. Microchemical Journal, 2017, 133, p.p. 265-271.
- [23] Qu, H., Mudalige. T. K., Linder. S. W. **Arsenic Speciation in Rice by Capillary Electrophoresis/Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Enzyme-assisted Water-phase Microwave Digestion**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(12), p.p. 3153-3160.
- [24] Signes-Pastor, A. J., Carey. M., Meharg. A. A. **Inorganic Arsenic in Rice-based Products for Infants and Young Children**. Food Chemistry, 2016, 191, p.p. 128-134.

-
- [25] Fang, Y., Pan, Y., Li, P., Xue, M., Pei, F., Yang, W., Ma, N., Hu, Q. **Simultaneous Determination of Arsenic and Mercury Species in Rice by Ion-pairing Reversed Phase Chromatography with Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry**. Food Chemistry, 2016, 213, p.p. 609-615.
- [26] Matsumoto, E., Sugimoto, T., Kawaguchi, T., Sakakibara, N., Yamashita, M. **Determination of Inorganic Arsenic in Fish Oil and Fish Oil Capsules by LC-ICP-MS**. Journal of AOAC INTERNATIONAL, 2021, 104(2), p.p. 397-403.
- [27] Nguyen, M. H., Pham, T. D., Nguyen, T. L., Vu, A. H., Ta, T. T., Tu, M. B., Nguyen, T. H. Y., Chu, D. B. **Speciation Analysis of Arsenic Compounds by HPLC-ICP-MS: Application for Human Serum and Urine**. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2018, p.p. 1-8
- [28] Nookabkaew, S., Rangkadilok, N., Mahidol, C., Promsuk, G., Satayavivad, J. **Determination of Arsenic Species in Rice from Thailand and Other Asian Countries Using Simple Extraction and HPLC-ICP-MS Analysis**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(28), p.p. 6991–6998
- [29] AOAC International. **SMPR 2015.006 Standard Method Performance Requirements (SMPR®) for Quantitation of Arsenic Species in Selected Foods and Beverages**, 2015.
- [30] Xu, X. Y., McGrath, S. P., Meharg, A. A., Zhao, F. J. **Growing Rice Aerobically Markedly Decreases Arsenic Accumulation**. Environmental Science & Technology, 2008, 42(15), p.p. 5574-5579.
- [31] สิริรัฐญา ผดุงอรรถ และคณะ. **การศึกษาสถานการณ์การปนเปื้อนสารหนูในข้าวมีสีพันธุ์ต่างๆ ของประเทศไทย**. วารสารพิษวิทยาไทย, 2559, 31(1), หน้า 36-49.