

วิธีการวิเคราะห์ไอโอดีนในเกลือที่เหมาะสม สำหรับสถานประกอบการเกลือขนาดกลางและเล็ก

Appropriate Analytical Methods of Iodine in Salts for Small and Medium Size of Salt Producers

ครรชิต จุดประสงศ์*, วิสิษฐ จະวะสิต, ปิยนัฐ ศรีดอนไผ่ และจันทิมา โฟติ

สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

Kunchit Judprasong*, Visith Chavasit, Piyanut Sridonpai and Juntima Photi

Institute of Nutrition, Mahidol University, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170

บทคัดย่อ

วิธีการตรวจสอบปริมาณไอโอดีนในเกลือเชิงกึ่งปริมาณและเชิงปริมาณมีการพัฒนา และนำไปใช้ในสถานประกอบการขนาดกลางและเล็ก อย่างไรก็ตาม ยังพบปัญหาหลังนำไปใช้งานจริงในสถานประกอบการ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ ที่มีการใช้เพื่อหาปริมาณไอโอดีนในเกลือ เก็บตัวอย่างเกลือที่มีการเสริมไอโอดีนด้วยโพแทสเซียมไอโอเดตที่ระดับ 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พีพีเอ็ม) จากสถานประกอบการผลิตเกลือ ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ของประเทศไทย โดยเป็นเกลือสินเธาว์ 80 ตัวอย่าง และเกลือทะเล 60 ตัวอย่าง วิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนด้วย 4 วิธี ได้แก่ (ก) วิธีไตเตรชัน ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน (ข) วิธีไอริเดเตอร์แบบปกติ (ประมาณเกลือ 0.1 กรัม) (ค) วิธีไอริเดเตอร์แบบชั่งเกลือ 10 กรัม และ (ง) ไอคิตที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไมโครพัต ผลการศึกษาที่วิเคราะห์ด้วยวิธีไตเตรชันพบว่าตัวอย่างเกลือเสริมไอโอดีนที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวคู่ มีปริมาณไอโอดีนอยู่ในช่วง 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และร้อยละความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 10 ในขณะที่เครื่องผสมแบบอื่น ๆ พบว่าไม่ผ่านทั้งสองเกณฑ์ การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับไตเตรชันพบว่ามีความสัมพันธ์สูงค่า 0.99, 0.87 และ 0.83 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไอริเดเตอร์แบบชั่ง 10 กรัม วิธีไอริเดเตอร์แบบช้อนตัก 0.1 กรัม และวิธีไอคิตที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไมโครพัต ตามลำดับ ถึงแม้ว่าวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ มีความสัมพันธ์ที่ดีกับวิธีไตเตรชันแต่พบว่าค่าความถูกต้องไม่ตรงกับการใช้วิธีวิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีไอริเดเตอร์แบบ 10 กรัม และวิธีไอคิตที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไมโครพัต มีความเหมาะสมกับสถานประกอบการขนาดกลางและเล็ก ด้วยความตระหนักว่าเป็นวิธีเชิงกึ่งปริมาณเท่านั้น วิธีไตเตรชันเป็นวิธีมาตรฐานที่เหมาะสมต่อการบังคับใช้กฎหมายควบคุมการผลิตเกลือเสริมไอโอดีน

คำสำคัญ : เกลือเสริมไอโอดีน; วิธีวิเคราะห์; ระบบควบคุมคุณภาพ; ผู้ประกอบการผลิตเกลือ

*ผู้รับผิดชอบบทความ : kunchit.jud@mahidol.ac.th

Abstract

Both semi-quantitative and quantitative analytical methods for iodine analysis in salt are introduced and implemented at small and medium scale producers. However, their feasibilities in using at the small and medium scale producers were still in doubt. This study aimed to evaluate the accuracy of the available salt iodine analytical methods. Salts fortified with potassium iodate at 20-40 mg kg⁻¹ (ppm) were sampled from the production sites located in the northeastern, central and southern parts of Thailand. The iodized salt samples (80 of rock salt and 60 of sea salt) were analyzed by using 4 methods, i.e. (i) standard titration, (ii) I-reader (0.1 g salt), (iii) modified I-reader (10 g salt), and (iv) modified I-kit (read on developed color-scale ruler). The results from the titration method indicated that the fortification of iodine levels using double ribbon mixing provided both iodine within 20-40 mg kg⁻¹ and coefficient of variance, CV < 10 %. Other type of batch mixing and continuous mixing process still have problem on both criteria. The correlations with the results from titration methods of salts were 0.99, 0.87 and 0.83 for the modified I-reader, I-reader and modified I-kit, respectively. Although values read from analytical methods other than the titration method have good correlation but the accurate are not good. In case of small and medium scale producers, it could be compromise for the I-reader (10 g) or modified I-kit with the awareness that they could be only for semi-quantitative tests. The standard titration method is still required for quality control especially for mandatory action.

Keywords: iodized salt; analytical method; quality control system; salt producer

1. บทนำ

ปัญหาการขาดสารอาหารที่เกิดขึ้นมานานกว่า 50 ปี ของประเทศไทย คือ โรคขาดสารไอโอดีน และได้มีความพยายามในการลดอุบัติการณ์การเกิดโรคในหลายรูปแบบ หนึ่งในมาตรการดังกล่าว คือ มาตรการการบังคับใช้กฎหมาย ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) กระทรวงสาธารณสุข ได้ออกประกาศกระทรวงสาธารณสุขที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องเสริมสารไอโอดีน ได้แก่ เกลือบริโภค [1] น้ำปลา [2] ผลิตภัณฑ์ปรุงรสที่ได้จากการย่อยโปรตีนของถั่วเหลือง [3] และน้ำเกลือปรุงอาหาร [4] เกลือบริโภค ตามประกาศฯ ฉบับปรับปรุงลงวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2554 หมายความว่าเกลือแกงที่ใช้เป็นอาหาร หรือใช้เป็นส่วนผสมหรือเป็นส่วนประกอบของ

อาหาร และต้องมีปริมาณไอโอดีนไม่น้อยกว่า 20 มิลลิกรัม และไม่เกิน 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ppm) การเสริมไอโอดีนในเกลือบริโภคเป็นวิธีการหลักที่มีการดำเนินการมาโดยตลอด ทั้งในและต่างประเทศ แต่ปัจจุบันยังพบปัญหาขาดสารไอโอดีนในประเทศไทยอยู่ โดยแบ่งจากระดับไอโอดีนในปัสสาวะหญิงตั้งครรภ์ที่น้อยกว่า 150 µg L⁻¹ ตามเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก โดยกำหนดให้พื้นที่ซึ่งมีสัดส่วนของหญิงตั้งครรภ์ที่มีระดับไอโอดีนในปัสสาวะต่ำกว่าที่กำหนดไว้มากกว่าร้อยละ 50 เป็นพื้นที่ขาดสารไอโอดีน ซึ่งข้อมูลที่ยืนยันโดยกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข [5] พบว่ามีค่าร้อยละ 61.3, 58.5, 59.0 และ 52.4 ในปี พ.ศ. 2550-2553 ตามลำดับ คณะกรรมการป้องกันแก้ไขและจัดการขาดสารไอโอดีนในเด็กและเยาวชน

จึงหาทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น โดยหนึ่งในแนวทางที่สำคัญ คือ การควบคุมคุณภาพหรือมาตรฐานของเกลือบริโภค โดยให้มีปริมาณไอโอดีน 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอด้วยการประเมินค่าร้อยละของความแปรปรวน (coefficient of variance, CV) ไม่เกินร้อยละ 10 [6] การตรวจสอบปริมาณไอโอดีนในเกลือบริโภคโดยวิธีการที่เหมาะสม ดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว และยังคงให้ค่าที่มีความถูกต้อง จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก

วิธีตรวจสอบคุณภาพของเกลือเสริมไอโอดีนที่เป็นวิธีมาตรฐานและได้รับความนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี คือ วิธีไทเทรชัน (titration) ที่วิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีนในเกลือที่อยู่ในรูปของไอโอเดท [7,8] แต่วิธีนี้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์และต้องการนักวิทยาศาสตร์หรือผู้ที่มีความชำนาญในการใช้สารเคมีและเครื่องแก้ว ทำให้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ไม่ใช่วิธีการนี้ในการควบคุมคุณภาพการผลิตเกลือเสริมไอโอดีน สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดสารไอโอดีนที่สามารถตรวจทั้งในห้องปฏิบัติการและนอกสถานที่ ทำให้เพิ่มความสะดวกมากขึ้น โดยใช้น้ำยาสำเร็จรูปสำหรับวัดปริมาณไอโอดีนในเกลือ (I-reagent) เติมนลงในน้ำเกลือแล้ววัดสี (OD 500 nm) หลังจากทิ้งไว้ 5 นาที ด้วยเครื่องวัดสีอย่างง่าย (I-reader) สามารถบอกปริมาณไอโอดีนในเกลือได้ละเอียดถึงระดับ 0-100 ppm [9-11] และพัฒนาชุดตรวจสอบภาคสนามชนิดขวดเดียวสำหรับวัดปริมาณไอโอดีนในเกลือ (I-kit) โดยการอ่านค่าปริมาณไอโอดีนในเกลือเป็นช่วง ๆ จากการเปรียบเทียบสีกับแผ่นเทียบสีมาตรฐานของชุดตรวจสอบไอโอดีนในเกลือที่ระดับความเข้มข้น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้มีความสะดวก ใช้งานง่าย เหมาะกับการควบคุมคุณภาพ ณ จุดผลิต ที่ต้องการความรวดเร็ว [9,10] แต่เนื่องจากวิธีเหล่านี้มี

ข้อจำกัดในเรื่องของการใช้ตัวอย่างเกลือทดสอบเพียงเล็กน้อย (1 ซ้อนดกที่นำมา หรือประมาณ 0.1 กรัม) ทำให้ปริมาณไอโอดีนที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือน้อยลง ดังนั้นการดัดแปลงวิธีที่ตรวจวัดได้อย่างรวดเร็วให้มีความถูกต้องแม่นยำเพิ่มขึ้น จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการควบคุมคุณภาพ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อดัดแปลงวิธีเฝ้าคิดด้วยการอ่านด้วยไม้บรรทัด และใช้วิธีไอรีดเดอร์ทั้งแบบชั่ง 10 กรัม และแบบช้อนดกเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานไตรเตรชัน เพื่อประเมินวิธีวิเคราะห์ไอโอดีนในเกลือที่เหมาะสม สำหรับควบคุมคุณภาพในสถานประกอบการขนาดกลางและเล็ก

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ศึกษาทั้งหมดเป็นตัวอย่างเกลือที่เสริมไอโอดีนด้วยโพแทสเซียมไอโอเดต (potassium iodate) ให้มีปริมาณไอโอดีนในระดับ 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พีพีเอ็ม, ppm) จำนวน 140 ตัวอย่าง เป็นเกลือสินเธาว์ 80 ตัวอย่าง จากสถานประกอบการขนาดกลางและเล็ก จำนวน 9 แห่ง ในจังหวัดอุดรธานี และมหาสารคาม ซึ่งเป็นแหล่งผลิตเกลือสินเธาว์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และเกลือทะเล 60 ตัวอย่าง จากสถานประกอบการขนาดกลาง จำนวน 6 แห่ง ในจังหวัดราชบุรี เพชรบุรี และสมุทรสาคร ซึ่งเป็นแหล่งผลิตเกลือทะเลในภาคกลางและภาคใต้ของประเทศไทย เครื่องผสมเกลือเสริมไอโอดีนโดยทั่วไปมี 2 แบบ คือ ผสมแบบชุด (batch mixing) และผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing process) ซึ่งมีหลักการพื้นฐาน คือ การปรับอัตราส่วนของเกลือที่ใช้ต่อน้ำยาโพแทสเซียมไอโอเดตที่เติมลงไป ตัวอย่าง เช่น เกลือที่ใช้ในการผสมแบบชุดครั้งละ 40 กิโลกรัม ใช้น้ำยาโพแทสเซียมไอโอเดต (40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) จำนวน 30 มิลลิลิตร แล้วผสมเกลือให้เข้ากัน จะทำให้

เกลือมีปริมาณไอโอดีนประมาณ 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอยู่ในช่วงของความเข้มข้นตามที่กฎหมายกำหนดไว้ คือ 20-40 มิลลิกรัมต่อโลกรัม สำหรับเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง เป็นการให้เกลือไหลผ่านเครื่องผสมอย่างต่อเนื่องแล้วสเปรย์น้ำยาโพแทสเซียมไอโอเดตลงไป ซึ่งแล้วแต่การออกแบบของผู้ผลิต หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการผสม ก่อนปล่อยเกลือเพื่อบรรจุลงต่อไป ดังนั้นปริมาณน้ำยาโพแทสเซียม ไอโอเดตที่ใช้จะปรับอัตราการฉีดน้ำยาให้เหมาะสมกับอัตราการไหลของเกลือ ซึ่งโดยทั่วไปผู้ประกอบการจะคำนวณเพื่อให้เกลือมีปริมาณไอโอดีนประมาณ 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกัน

สุ่มเกลือแต่ละตัวอย่างจากกองเกลือ ตัวอย่างละ 5 จุด (ซ้าย ขวา หน้า หลัง และกลางกองเกลือ) สำหรับกรณีที่เกิดเป็นชุด ๆ (batch process) หรือสุ่มตัวอย่างทุก ๆ 30 วินาที ของการผลิตแบบต่อเนื่อง (continuous process) เป็นเวลา 5 นาที ตัดฉลากตัวอย่างแต่ละกลุ่มเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างเกลือเสริมไอโอดีนที่ศึกษาเก็บรวบรวมมาจากแหล่งต่าง ๆ นำมาเตรียม และวิเคราะห์

ปริมาณไอโอดีนที่สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล นำเกลือแต่ละตัวอย่างมาใส่ในถุงพลาสติกใสขนาด 4x6 นิ้ว พับถุงให้โป่งพอง ปิดถุงด้วยหนังยาง เขย่าถุงเกลือผสมให้เข้ากัน 1 นาที นำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีนและความชื้น

2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีน

ตัวอย่างเกลือแต่ละตัวอย่าง วิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนด้วย 4 วิธี ได้แก่

2.3.1 วิธีไทเทรตชัน (titration) เป็นวิธีมาตรฐานของ The International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders (ICCIDD) [7] ด้วยหลักการ “Iodometric titration” [8] ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) โดยมีขั้นตอนอย่างย่อคือ เติมกรดซัลฟูริกเพื่อทำให้ไอโอดีนแตกตัวจากโพแทสเซียมไอโอเดตเป็นไอโอดีนอิสระ เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ที่มากเกินไป (excess potassium iodide) เพื่อช่วยในการละลายของไอโอดีนอิสระ ซึ่งปกติไม่ค่อยละลายในน้ำด้วยสถานะปกติ ไทเทรตหาปริมาณไอโอดีนด้วยสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (sodium thiosulfate) โดยเติมน้ำแบ่งเพื่อใช้ในการอ่านจุดยุติจากสีน้ำเงินเป็นไม่มีสี



2.3.2 วิธีไอรีดเดอร์ปกติ (I-reader) ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยมหิดล [9-11] โดยมีวิธีการอย่างย่อ คือ ตักเกลือ 1 ช้อน (ช้อนที่ผู้ผลิตให้มา ซึ่งประมาณเกลือ 0.1 กรัม) เติมน้ำกลั่น 0.5 มิลลิลิตร และน้ำยาสำเร็จรูป I-reagent จำนวน 3 มิลลิลิตร เขย่าผสมให้เข้ากัน ถ้าเกลือมีไอโอดีนผสมอยู่จะเกิดสีน้ำเงิน ซึ่งการเกิดสีดังกล่าวเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอโอดีนและสารละลายแบ่ง วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง I-reader หรือ spectrophotometer ที่ความ

ยาวคลื่น 500 นาโนเมตร หลังจากการผสม 5 นาที แล้วเครื่องจะคำนวณเป็นปริมาณไอโอดีนเป็นส่วนในล้านส่วน หรือพีพีเอ็ม (ppm) เทียบกับสารละลายไอโอดีนมาตรฐาน ซึ่งรายละเอียดปฏิบัติตามคู่มือวัดที่ได้รับจากผู้ผลิตเครื่อง I-reader

2.3.3 วิธีไอรีดเดอร์แบบใช้เกลือ 10 กรัม ทำโดยการชั่งเกลือ 10 กรัม ละลายน้ำให้ครบ 50 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำเป็น 50 มิลลิลิตร แล้วตรวจวัดด้วยไอรีดเดอร์ เช่นเดียวกับข้อ 2.3.2)

2.3.4 ไอคิตที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัด ไอคิตแบบปกติ (I-kit) [9,10] เป็นชุดทดสอบไอโอดีนเชิงกึ่งปริมาณ (semi-quantitative method) ทำโดยการตักเกลือ 1 ช้อน (ที่ผู้ผลิตให้มา) ใส่ลงในแผ่นพลาสติกสีขาว (ที่ผู้ผลิตให้มาเช่นกัน) หยดน้ำยาจำนวน 3 หยด แล้วใช้ปลายช้อนคลุกให้เข้ากัน โดยผสมให้เป็นวงกลมที่มีขนาดเท่ากันขวด และอ่านค่าสีน้ำเงินที่ได้กับสีของฉลากข้างกล่องไอคิต ซึ่งกำหนดค่าที่อ่านได้เป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 ฟิฟเอ็ม (โดยหากเกลือมีปริมาณไอโอดีนมากจะเกิดเป็นมีสีน้ำเงินเข้ม ตามลำดับ) แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากช่วงของค่าสีที่ได้ใกล้เคียงกันมาก ทำให้การอ่านค่าเกิดความลำเอียงจากผู้อ่าน โดยเฉพาะกับผู้ประกอบการเกลือ มักมีความตั้งใจให้อ่านค่าได้ 30 ฟิฟเอ็ม อีกทั้งการสูมตัวอย่างเกลือเพียง 1 ช้อน (ที่ผู้ผลิตให้มา) (ประมาณ 0.1 กรัม) อาจไม่เป็นตัวแทนของการทดสอบ โดยเฉพาะกับตัวอย่างที่มีขนาดเม็ดเกลือไม่สม่ำเสมอหรือใหญ่กว่าช้อนตัก นอกจากนั้นหากกรณีทีเกลือมีปริมาณไอโอดีนมากกว่า 50 ฟิฟเอ็ม ค่าที่อ่านได้จะเท่ากับค่าสูงสุดของระดับค่าสี คือ 50 ฟิฟเอ็ม ทำให้การควบคุมการผลิตเกลือในสถานประกอบการขนาดกลางและเล็ก เกิดความผิดพลาดขึ้น

คณะผู้วิจัยจึงพัฒนาวิธีวิเคราะห์ไอโอดีนโดยเพิ่มปริมาณเกลือและน้ำยาเป็น 2 เท่า คือ ใช้เกลือ 2 ช้อน และน้ำยา 6 หยด และดัดแปลงการอ่านค่าสีโดยนำค่าสีที่อยู่ข้างกล่องไอคิตมาติดกาไว้บนไม้บรรทัดที่มีขนาดยาว 15 เซนติเมตร โดยวางค่าสีห่างกัน 3 เซนติเมตรโดยวางที่ตำแหน่ง 3, 6, 9, 12 และ

15 เซนติเมตร ด้วยแถบสีของ 10, 20, 30, 40 และ 50



รูปที่ 1 ตัวอย่างวัสดุและอุปกรณ์ของชุดทดสอบไอคิตที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัด

ฟิฟเอ็ม ตามลำดับ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1 หลังจากผสมเกลือกับน้ำยาเรียบร้อยแล้ว นำภาชนะผสมสีมาวางในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับสีที่อยู่บนไม้บรรทัด แล้วอ่านค่าของระยะห่างจากจุดเริ่มต้นเป็นเซนติเมตร คำนวณค่าที่อ่านได้โดยการคูณกับ 3.33 เป็นปริมาณไอโอดีน (ฟิฟเอ็ม) ซึ่งค่า 3.33 มาจากการคำนวณเปรียบเทียบระยะ 15 เซนติเมตรของไม้บรรทัดกับปริมาณไอโอดีน 50 ฟิฟเอ็ม ดังแสดงในสมการที่ 3) คือ

$$\text{ปริมาณไอโอดีน} = \text{ความยาวที่อ่านได้ (เซนติเมตร)} \times (50 \div 15 \text{ หรือ } 3.33) \quad (3)$$

2.4 การวิเคราะห์ความชื้น

วิเคราะห์ความชื้นในตัวอย่างเกลือโดยใช้เครื่องวัดความชื้นระบบอิมพีแดนซ์แบบ

อินฟราเรด (Infrared moisture determination balance, model FD-610, Kett, Japan) [12] โดยการชั่งน้ำหนักเกลือประมาณ 2 ถึง 4 กรัม บนภา

พอยด์ของเครื่องชั่ง อ่านค่าน้ำหนักเกลือ แล้วเปิดเครื่องโดยกำหนดให้ตัวอย่างเกลือสัมผัสกับแสงอินฟราเรดขนาด 250-500 วัตต์ เพื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 15 นาที เครื่องคำนวณปริมาณความชื้นจากมวลของตัวอย่างเปรียบเทียบกับมวลเริ่มต้น แสดงผลในหน่วยกรัมต่อ 100 กรัม ทดสอบความชื้นตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

2.5 การควบคุมคุณภาพ

การศึกษาครั้งนี้มีการประกันคุณภาพการวิเคราะห์ ด้วยการเตรียมตัวอย่างเกลือควบคุมคุณภาพที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (in-house quality control sample) โดยซื้อเกลือบริสุทธิ์คุณภาพพิเศษแบบแห้งผสมไอโอดีน (99.9 % NaCl) ยี่ห้อปรุททิพย์® (บริษัทอุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดนครราชสีมา) ที่ผลิตในชุดเดียวกันจำนวน 3 กิโลกรัม นำมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันในถุงขนาดใหญ่ที่บรรจุเกลือได้ 5 กิโลกรัม มัดถุงให้โป่งพอง เขย่าไปมาประมาณ 10 นาที แบ่งบรรจุลงในซองอลูมิเนียมพอยด์ขนาดเล็ก บรรจุซองละประมาณ 10 กรัม ได้เกลือควบคุมคุณภาพจำนวนประมาณ 300 ซอง สุ่มตัวอย่างมาจำนวน 10 ซอง เพื่อทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันโดยวิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีไตรเอตตรอน แล้วนำค่าปริมาณไอโอดีนมาสร้างกราฟควบคุมมาตรฐาน (QC chart) หลังจากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างควบคุมคุณภาพในทุก ๆ ชุดการทดสอบตัวอย่าง โดยเกณฑ์การยอมรับอยู่ในช่วงของค่าเฉลี่ยและ 2 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\text{mean} \pm 2SD$)

2.6 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

สถิติที่ใช้ในการศึกษานี้แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($\text{mean} \pm SD$) โดยคำนวณจากโปรแกรม Microsoft Excel 2013 สำหรับสถิติที่ใช้ในการทดสอบค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การวิเคราะห์ความ

แปรปรวน (analysis of variance) แบบจำแนกทางเดียว (one-way ANOVA) หลังจากพบว่าค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ ที่แตกต่างกัน ทดสอบค่าเฉลี่ยว่าคู่ใดบ้างที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ด้วยสถิติ Fisher's LSD (least significant difference) โดยใช้โปรแกรม SPSS for Window, Version 13.0 (SPSS, Inc., USA)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การควบคุมคุณภาพการวิเคราะห์

การศึกษาค่าความแม่นยำ (intermediate precision) ในตัวอย่างควบคุมคุณภาพจากการสุ่มตัวอย่าง 10 ซอง วิเคราะห์ของละ 2 ซ้ำ พบว่ามีปริมาณไอโอดีน 25.9 ± 1.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พีพีเอ็ม) ค่าร้อยละความแปรปรวน (% RSD) มีค่า 5.2 % เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก Horwitz equation ($\text{pRSD}_R = 2C^{-0.1505} = 9.8 \%$ โดย C เป็นค่าเฉลี่ยของไอโอดีนที่ไม่มีหน่วย คือ $25.9/1000/1000 = 0.0000259$) โดยหาค่า HORRAT ratio (RSD/pRSD_R) ซึ่งมีเกณฑ์การยอมรับ ตามมาตรฐาน AOAC, 2012 [13] อยู่ในช่วง 0.3-1.3 สำหรับกรณีนี้พบว่าผู้วิเคราะห์มีความแม่นยำดี (good precision, ค่า HORRAT = 0.53) นอกจากนั้นค่าที่ได้เริ่มต้นจำนวน 20 ข้อมูลนำไปสร้างกราฟควบคุมคุณภาพ แล้ววิเคราะห์ตัวอย่างควบคุมคุณภาพในทุก ๆ ชุดของการทดสอบเกลือตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าในทุกชุดของการวิเคราะห์ผ่านเกณฑ์การยอมรับคือมีค่าอยู่ในช่วงของค่าภายใน $\text{mean} \pm 2SD$

3.2 ปริมาณไอโอดีนในเกลือเสริมไอโอดีน

โดยทั่วไปการผลิตเกลือเสริมไอโอดีนของผู้ประกอบการเกลือทั้งเกลือสมุทรและเกลือสินเธาว์นั้นใช้เครื่องผสม 2 แบบ คือ แบบชุด (batch mixing) และแบบต่อเนื่อง (continuous mixing) แต่การ

ตรวจสอบปริมาณไอโอดีนในเกลือนั้นขึ้นกับระดับของผู้ประกอบการ เช่น ผู้ประกอบการรายย่อย ส่วนใหญ่ใช้ชุดทดสอบแบบทั่วไป ผู้ประกอบการรายกลางและรายใหญ่ มักใช้ไอริเตอร์แบบ 1 ซ้อนดัก เจ้าหน้าที่สำนักงานอาหารและยาและบุคลากรของกระทรวงสาธารณสุข ส่วนใหญ่ใช้ไอริเตอร์แบบซัง 10 กรัม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากต้องการมีผลบังคับทางกฎหมาย จำเป็นต้องใช้วิธีมาตรฐานไตรเตรชัน ดังนั้นการเปรียบเทียบผลจึงสามารถนำผลที่ได้ไปปรับใช้กับวัตถุประสงค์การใช้งาน และระดับของผู้ประกอบการ

3.2.1 ปริมาณไอโอดีนในเกลือที่ผลิตด้วยเครื่องผสมแบบชุด

ปริมาณไอโอดีนตามเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดคือต้องมีค่า 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเครื่องผสมเกลือไอโอดีนต้องมีค่าร้อยละความแปรปรวนน้อยกว่าร้อยละ 10 ปริมาณไอโอดีนในเกลือดตัวอย่างที่ผลิตด้วยเครื่องผสมแบบชุด และทดสอบด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมทั้งปริมาณความชื้น แสดงในตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่ศึกษาพบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 7 ในทุกตัวอย่าง ปริมาณไอโอดีนในเกลือเสริมไอโอดีนที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวคู่ (double ribbon batch mixing) ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาล (สำนักงานอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข) และตรวจวัดปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีไตรเตรชัน พบว่าผู้ประกอบการรายที่ 1 และ 2 ผ่านทั้งเกณฑ์ด้านปริมาณไอโอดีนซึ่งอยู่ในช่วง 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (35.3 ± 0.4 และ 28.2 ± 0.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวน (relative standard deviation, RSD หรือ coefficient of variance, CV (%) = $SD \times 100 / \text{mean}$) ที่มีค่าร้อยละ 1.0 และ 2.3 ตาม ลำดับ ในขณะที่ผู้ประกอบการรายที่ 3 พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์ด้านปริมาณไอโอดีน (14.5 ± 0.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ตามลำดับ) แต่ผ่านเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวนที่มีค่าร้อยละ 2.1 ทั้งนี้เนื่องมาจากผู้ประกอบการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไอโอเดตที่ใช้ในการผสมไม่ถูกต้อง มีการชั่งน้ำหนักน้อยกว่าปริมาณที่ควรจะเป็น หรือใช้เครื่องชั่งที่ไม่เหมาะสม เช่น การใช้เครื่องชั่งที่มีน้ำหนักเป็นกิโลกรัมมาใช้ในการชั่งสารโพแทสเซียมไอโอเดต 40.4 กรัม ซึ่งเครื่องชั่งที่เหมาะสมกับปริมาณสารโพแทสเซียมไอโอเดตดังกล่าวควรเป็นเครื่องชั่งที่มีความละเอียดเป็นกรัม หรือเครื่องชั่งดิจิตอล สำหรับเครื่องผสมแบบชุดที่ผู้ประกอบการออกแบบเอง พบว่าผู้ประกอบการรายที่ 4 ผ่านทั้งเกณฑ์ด้านปริมาณไอโอดีน (37.3 ± 1.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวนที่มีค่าร้อยละ 4.7 แต่ผู้ประกอบการรายที่ 5 พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์ด้านปริมาณไอโอดีน (51.6 ± 7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่ผ่านเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวนที่มีค่าร้อยละ 5.2 ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดจากการชั่งน้ำหนักโพแทสเซียมไอโอเดตที่ใช้ในการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกัน

สำหรับการตรวจวัดปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีอื่น ๆ พบว่าวิธีไอริเตอร์แบบใช้ 10 กรัม ในตัวอย่างที่ผสมแบบชุด มีปริมาณไอโอดีนน้อยกว่าวิธีไตรเตรชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องไอริเตอร์มีประสิทธิภาพที่ต่ำลง โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้งานมากกว่า 1 ปี จำเป็นต้องมีการนำไปสอบเทียบ (calibrate) กับผู้ผลิตเครื่องเป็นระยะ ๆ อย่างน้อยปีละครั้ง ซึ่งผู้วิจัยศึกษายืนยันแล้วพบว่าเมื่อนำเครื่องไปสอบเทียบแล้วนำมาทดสอบตัวอย่างเกลือดเดียวกันพบว่าค่าปริมาณไอโอดีนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับวิธีไตรเตรชัน (ข้อมูลทำเพียงบางตัวอย่าง จึงไม่นำเสนอผล) ในขณะที่วิธีไอริเตอร์แบบ 1 ซ้อนดัก (ประมาณ 0.1 กรัม) มีปริมาณไอโอดีนสูงกว่าวิธีไตรเตรชัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการชั่งตัวอย่างด้วยช้อนตักจำนวน 1 ช้อน

ที่มีปริมาณเกลือเพียงเล็กน้อย และการตักแต่ละครั้ง อาจมีปริมาณเกลือไม่คงที่ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำยา ทดสอบ ทำให้สัดส่วนของเกลือต่อน้ำยาทดสอบไม่เหมาะสม การวิเคราะห์จึงทำให้เกิดการเบี่ยงเบนจาก ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีโทรเตรชัน เมื่อ พิจารณาเกณฑ์การผสมโดยใช้ค่าร้อยละความ แปรปรวนที่น้อยกว่าร้อยละ 10 พบว่าวิธีการตรวจ ปริมาณไอโอดีนโดยใช้เกลือ 10 กรัม มีความแม่นยำ ดีกว่า (good precision) วิธีไอรด์เตอร์แบบ 1 ซ้อนตัก (ประมาณ 0.1 กรัม) ซึ่งเห็นได้จากค่าร้อยละความ

แปรปรวน (% CV) ของวิธีไอรด์เตอร์แบบใช้ 10 กรัม มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 3.5 ในขณะที่วิธีไอรด์เตอร์แบบ 1 ซ้อนตักมีค่ามากกว่าร้อยละ 10 ในตัวอย่างทดสอบ เดียวกัน ผู้ผลิตเครื่องไอรด์เตอร์แนะนำให้อ่านปริมาณ ไอโอดีนหลังจากการผสมเกลือกับน้ำยาทดสอบเป็น เวลา 5 นาที แต่เนื่องจากผู้วิจัยทดลองเปรียบเทียบ ระยะเวลาการอ่านเป็นเท่าตัว ซึ่งพบว่าปริมาณไอโอดีน มีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง แต่ไม่มีความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

ตารางที่ 1 ปริมาณไอโอดีนและความชื้นในเกลือที่ผลิตในเครื่องผสมแบบชุด (batch mixing)

ผู้ผลิต	จุดที่เก็บ ตัวอย่าง	วิธี ไตรเตรชัน	ปริมาณไอโอดีนที่วิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ กัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือฟิฟเอ็ม)					ปริมาณ ความชื้น (%)
			วิธีไอรด์เตอร์ แบบซัง 10 กรัม		วิธีไอรด์เตอร์ แบบ 1 ซ้อนตัก (0.1 กรัม)		ไอคิดที่ดัดแปลงการ อ่านด้วยไม้บรรทัด	
			อ่านค่าที่ 5 นาที	อ่านค่าที่ 10 นาที	อ่านค่าที่ 5 นาที	อ่านค่าที่ 10 นาที		
เครื่องผสมแบบเกลียวคู่ (double ribbon batch mixing)								
1	เก็บตัวอย่าง	35.3±0.4 ^b	27.5±0.5 ^a	30.7±0.5 ^a	51.9±5.4 ^c	52.8±5.7 ^c	36.0±2.5 ^b	2.8±0.1
	หลังการผสม	(1.0%)*	(1.9%)	(1.6%)	(10.4%)	(10.7%)	(6.9%)	(2.0%)
2	เก็บตัวอย่าง	28.2±0.6 ^b	21.6±0.3 ^a	24.1±0.3 ^a	35.2±5.5 ^c	38.9±7.1 ^c	31.3±2.4 ^b	3.4±0.4
	หลังการผสม	(2.3%)	(1.5%)	(1.2%)	(15.8%)	(18.2%)	(7.6%)	(11.2%)
3	เก็บตัวอย่าง	14.5±0.3 ^a	11.0±0.3 ^a	12.4±0.4 ^a	18.3±1.6 ^b	18.8±1.5 ^b	13.3±1.4 ^a	1.2±0.2
	หลังการผสม	(2.1%)	(2.6%)	(2.9%)	(8.5%)	(8.1%)	(10.3%)	(16.9%)
เครื่องผสมแบบชุดแบบถังผสม (batch mixing)								
4	เก็บตัวอย่าง	37.3±1.8 ^b	28.0±0.9 ^a	31.4±1.1 ^a	54.5±12.8 ^c	55.6±12.9 ^c	32.6±2.0 ^a	7.3±0.3
	หลังการผสม	(4.7%)	(3.3%)	(3.5%)	(23.6%)	(23.2%)	(6.1%)	(3.6%)
5	เกลือที่รอ จำหน่าย	51.6±2.7 ^b	38.0±0.6 ^a	42.9±0.7 ^a	59.2±7.2 ^c	60.3±7.1 ^c	46.4±3.5 ^a	6.7±0.4
		(5.2%)	(1.5%)	(1.6%)	(12.2%)	(11.9%)	(7.5%)	(6.0%)

ตัวอักษรที่แตกต่างกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงปริมาณไอโอดีนที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %; * หมายถึงค่าร้อยละของความแปรปรวน (relative standard deviation, RSD หรือ coefficient of variance, CV (%) = $SD \times 100 / \text{mean}$) ซึ่งแต่ละตัวอย่างได้จากการสุ่มตัวอย่าง เกลือ 5 จุด

การตรวจวัดปริมาณไอโอดีนด้วยวิธี ไอคิดซึ่งดัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัดที่เปรียบเทียบกับวิธีโทรเตรชัน พบว่าปริมาณไอโอดีนมีค่าใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน ปริมาณไอโอดีนในตัวอย่างเกลือส่วนใหญ่ (สามผู้ประกอบการแรก) ไม่มีความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่มีความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)ในผู้ประกอบการรายที่ 4

และ 5 ส่วนค่าร้อยละความแปรปรวนมีค่าค่อนข้างดี มี ค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีนี้ใช้ ปริมาณเกลือ 2 ซ้อน กับน้ำยาจำนวน 6 หยด ซึ่ง มากกว่าเป็น 2 เท่า ของวิธีปกติ และการอ่านค่าสีที่ได้ สามารถอ่านได้โดยอิสระว่าสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นมีความเข้ม มากน้อยเพียงใด โดยใช้การอ่านสีเทียบกับความยาว ของไม้บรรทัด อีกทั้งผู้อ่านไม่เกิดความเอนเอียงในการ

อ่านค่าอีกด้วย

3.2.2 ปริมาณไอโอดีนในเกลือที่ผลิตด้วยเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง

ปริมาณไอโอดีนในเกลือตัวอย่างที่ผลิตด้วยเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง และทดสอบด้วยวิธีการต่าง ๆ รวมทั้งปริมาณความชื้น แสดงในตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นในตัวอย่างที่ศึกษาพบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 4 ในทุกตัวอย่าง ปริมาณไอโอดีนในเกลือเสริมไอโอดีนที่ผสมด้วยเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง แล้วตรวจวัดด้วยวิธีไตรเตรชัน พบว่าผู้ประกอบการรายที่ 2, 3 และ 4 ผ่านทั้งเกณฑ์ด้านปริมาณไอโอดีนซึ่งอยู่ในช่วง 20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (21.5 ± 3.1 , 29.4 ± 8.8 และ 37.5 ± 13.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) แต่เกณฑ์ร้อยละความแปรปรวน (% CV) ที่มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดคือมีค่าร้อยละ 14.6, 29.8 และ 36.9 ตามลำดับ ในขณะที่ผู้ประกอบการรายที่ 1 และ 5 พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์ด้านปริมาณไอโอดีน (17.8 ± 4.5

และ 81.0 ± 8.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) และไม่ผ่านเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวนเช่นเดียวกัน คือพบว่าที่มีค่าร้อยละ 25.0 และ 10.9 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากผู้ประกอบการแต่ละแห่งมีการออกแบบเครื่องผสมเอง ยังไม่มีเครื่องผสมที่เป็นต้นแบบ ซึ่งจากการสัมภาษณ์ข้อมูลของผู้ผลิตพบว่าปัญหาเกิดจากอัตราส่วนของเกลือที่ไหลผ่านกับปริมาณน้ำยาโพแทสเซียมไอโอเดตที่ฉีดลงไปไม่เหมาะสม ในบางช่วงที่น้ำยาสเปรย์ลงบนเกลือจะทำให้เกลือมีปริมาณไอโอดีนมากกว่าที่ควรจะเป็น ในขณะที่ช่วงที่น้ำยาไม่ได้สเปรย์พบว่าเกลือช่วงนั้นจะมีปริมาณไอโอดีนน้อยกว่าที่ตั้งไว้นั่นเอง อีกทั้งเครื่องที่ผู้ประกอบการใช้ส่วนใหญ่มีระบบการผสมหลังการสเปรย์น้ำยาที่ยังไม่ดีพอ ยกเว้นผู้ประกอบการรายที่ 5 ที่ใช้เครื่องผสมแบบต่อเนื่องที่ลักษณะการผสมเป็นแบบใช้ใบผสมเป็นแบบเกลียวคู่ที่พาเกลือไปมา ก่อนนำไปบรรจุ ซึ่งจะเห็นว่าค่าร้อยละความแปรปรวนมีค่าค่อนข้างดี คือ ร้อยละ 10.9

ตารางที่ 2 ปริมาณไอโอดีน และความชื้นในเกลือที่ผลิตในเครื่องผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixing process)

ผู้ผลิต	จุดที่เก็บตัวอย่าง	วิธี ไตรเตรชัน	ปริมาณไอโอดีนที่วิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ กัน (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หรือพีพีเอ็ม)					ปริมาณ ความชื้น (%)
			วิธีไอริเดเตอร์ แบบชั่ง 10 กรัม		วิธีไอริเดเตอร์ แบบ 1 ซ้อนตัก (0.1 กรัม)		ไอคิตที่ดัดแปลงการ อ่านด้วยไมโครทิต	
			อ่านค่าที่ 5 นาที	อ่านค่าที่ 10 นาที	อ่านค่าที่ 5 นาที	อ่านค่าที่ 10 นาที		
1	ตัวอย่างจาก บริเวณที่รอ จำหน่าย	17.8±4.5 ^b	12.4±3.5 ^a	14.2±3.8 ^a	24.8±6.6 ^c	25.5±6.8 ^c	16.5±5.1 ^b	3.6±0.1
		(25.0%)	(27.9%)	(26.8%)	(26.7%)	(26.7%)	(30.9%)	(1.6%)
2	เก็บตัวอย่างหลัง การผสม	21.5±3.1 ^b	16.0±2.3 ^a	17.8±2.8 ^a	24.8±4.2 ^b	26.7±4.6 ^c	22.2±2.7 ^b	2.4±0.4
		(14.6%)	(14.5%)	(15.8%)	(16.7%)	(17.2%)	(12.1%)	(16.7%)
3	เก็บตัวอย่างที่ กำลังบรรจุ	29.4±8.8 ^b	23.5±6.9 ^a	25.7±7.6 ^a	34.8±8.9 ^c	38.1±10.4 ^c	32.1±11.3 ^b	2.8±0.3
		(29.8%)	(29.3%)	(29.7%)	(25.5%)	(27.2%)	(35.1%)	(10.4%)
4	เก็บตัวอย่างที่ กำลังบรรจุ	37.5±13.8 ^b	29.7±10.6 ^a	32.6±12.1 ^a	39.6±8.9 ^b	43.8±10.5 ^c	41.2±5.4 ^b	0.8±0.2
		(36.9%)	(35.7%)	(37.2%)	(22.6%)	(24.1%)	(13.1%)	(25.0%)
5	เก็บตัวอย่างหลัง การผสม	81.0±8.8 ^c	61.6±5.5 ^b	71.8±7.4 ^b	อ่านค่าไม่ได้	อ่านค่าไม่ได้	48.5±2.2 ^a	3.8±0.2
		(10.9%)	(8.9%)	(10.4%)			(4.6%)	(5.4%)

ตัวอักษรที่แตกต่างกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงปริมาณไอโอดีนที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %; * หมายถึงค่าร้อยละของความแปรปรวน (relative standard deviation, RSD หรือ coefficient of variance, CV (%) = $SD \times 100 / \text{mean}$) ซึ่งแต่ละตัวอย่างได้จากการสุ่มตัวอย่างเกลือ 5 จุด

สำหรับการตรวจวัดปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีอื่น ๆ พบว่าวิธีไอริเดเตอร์แบบใช้ 10 กรัม ในตัวอย่างที่ผสมแบบต่อเนื่อง มีปริมาณไอโอดีนน้อยกว่าวิธีไตรเตรชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากเครื่องไอริเดเตอร์มีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ใช้งานมากกว่า 1 ปี ยังไม่ได้สอบเทียบ (calibrate) เช่นเดียวกับเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ในขณะที่วิธีไอริเดเตอร์แบบ 1 ซ้อนดัก (0.1 กรัม) มีปริมาณไอโอดีนสูงกว่าวิธีไตรเตรชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องมาจากปริมาณเกลือที่ใช้เพียงเล็กน้อย และสัดส่วนของเกลือต่อน้ำยาทดสอบไม่เหมาะสมเช่นเดียวกับเหตุผลดังกล่าวข้างต้น สำหรับการเพิ่มระยะเวลาการอ่านของเครื่องไอริเดเตอร์ พบว่าปริมาณไอโอดีนมีปริมาณเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง แต่ส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาเกณฑ์การผสมที่ใช้ค่าร้อยละความแปรปรวนที่น้อยกว่าร้อยละ 10 พบว่าทุกผู้ประกอบการไม่ผ่านเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวน (% CV) คือ มีค่าร้อยละความแปรปรวนมากกว่าร้อยละ 14.5

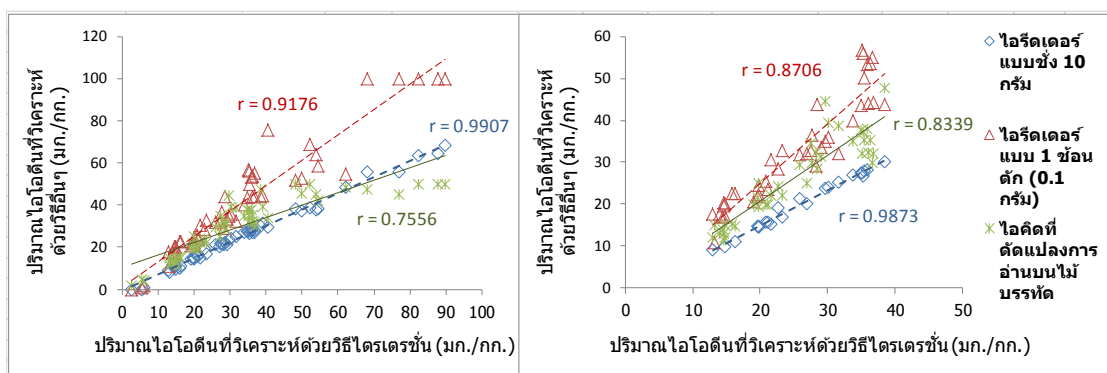
การตรวจวัดปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีไอคิตซึ่งตัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัดที่เปรียบเทียบกับวิธีไตรเตรชัน พบว่าปริมาณไอโอดีนมีค่าใกล้เคียง

กับวิธีมาตรฐาน ปริมาณไอโอดีนในตัวอย่างเกลือส่วนใหญ่ (ผู้ประกอบการรายที่ 1-4) พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ยกเว้นผู้ประกอบการรายที่ 5 ที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากปริมาณไอโอดีนที่มากกว่าค่าที่ชุดไอคิตสามารถอ่านได้ (50 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) ส่วนค่าร้อยละความแปรปรวนพบว่ามีค่ามากกว่าร้อยละ 10 เช่นเดียวกัน

3.3 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีต่าง ๆ กับวิธีไตรเตรชันของตัวอย่างเกลือที่ศึกษา

3.3.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของวิธีทดสอบ

ปริมาณไอโอดีนในตัวอย่างเกลือที่ศึกษาทั้งหมด วิเคราะห์ด้วยวิธีต่าง ๆ โดยเปรียบกับค่ามาตรฐานที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไตรเตรชัน แสดงในรูปที่ 1 (ซ้ายมือ) วิธีวิเคราะห์ไอโอดีนโดยใช้ไอริเดเตอร์แบบชั่งเกลือ 10 กรัม ในตัวอย่างเกลือที่ปริมาณไอโอดีนแตกต่างกันพบว่ามีความสัมพันธ์ดีกับการวิเคราะห์โดยวิธีไตรเตรชัน ($r = 0.9907$) ในขณะที่การวัดโดยวิธีไอริเดเตอร์แบบ 1 ซ้อนดัก นั้นมีความสัมพันธ์ค่อนข้างดี ($r = 0.9176$) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยไอคิตที่ตัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัดพบว่ามีความสัมพันธ์น้อยที่สุด ($r = 0.7556$) ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัด



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับวิธีไตรเตรชันของตัวอย่างที่ศึกษาทั้งหมด (ซ้าย) และตัวอย่างที่อยู่ในช่วง 10-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ขวา)

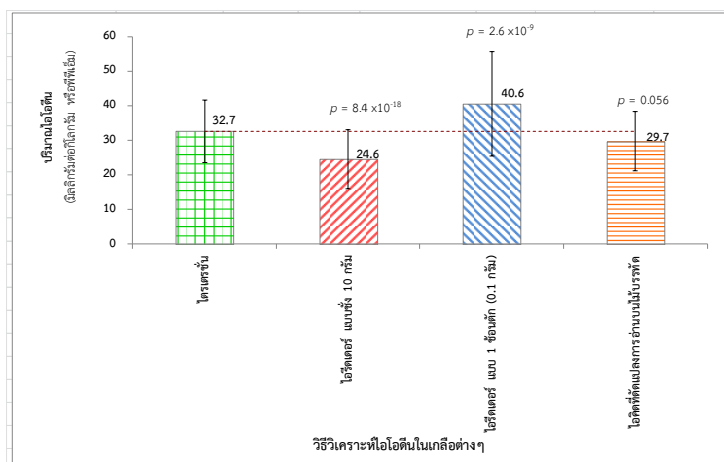
ของวิธีวิเคราะห์ในการวิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนที่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่าสีน้ำเงินที่อ่านได้มีความเข้มมาก ไม่สามารถอ่านค่าไอโอดีนได้ เมื่อนำปริมาณไอโอดีนในตัวอย่างเกลือที่น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมมาพิจารณา (รูปที่ 1 ขวามือ) พบว่าค่าความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์เพิ่มขึ้นเป็น 0.8939

3.3.2 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีต่าง ๆ

เนื่องจากวิธีวิเคราะห์ไอโอดีนในเกลือด้วยวิธีไตรเตรชัน เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในรับนานาชาติว่าเป็นวิธีมาตรฐาน วิธีนี้ให้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ และราคาถูก แต่มีข้อจำกัดที่ต้องการนักวิทยาศาสตร์หรือผู้ที่มีการศึกษาในการใช้เครื่องแก้วและสารเคมี ซึ่งเป็นไปได้ยากสำหรับผู้ประกอบการผลิตเกลือเสริมไอโอดีนในระดับกลางและเล็ก ทำให้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบหรือชุดทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ไอโอดีนในเกลือที่หลากหลายทั้งในและต่างประเทศ สำหรับประเทศไทย ไอรีดเดอร์และไอคิตเป็นเครื่องมือและชุดทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย อีกทั้งหน่วยงานราชการ เช่น สำนักงานอาหารและยา (อย.) ให้การสนับสนุนชุดทดสอบกับผู้ผลิตเกลือเสริมไอโอดีนต่าง ๆ ดังนั้นการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีต่าง ๆ จะทำให้ผู้ประกอบการในระดับ

ต่าง ๆ สามารถเลือกใช้เครื่องมือหรือชุดทดสอบที่เหมาะสมกับการใช้งาน และตามระดับของการนำไปใช้

การวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับวิธีไตรเตรชันของตัวอย่างที่ศึกษาทั้งหมดโดยใช้ตัวอย่างที่มีปริมาณไอโอดีนน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เท่านั้นที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ผลการศึกษาพบว่าผลการวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีไอรีดเดอร์แบบซัง 10 กรัม มีค่าไอโอดีนน้อยกว่า (24.6 ± 8.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานไตรเตรชัน (32.7 ± 9.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องไอรีดเดอร์มีประสิทธิภาพที่ต่ำลงดังกล่าวข้างต้น การวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีไอรีดเดอร์แบบซันตัก (ประมาณ 0.1 กรัม) พบว่ามีปริมาณไอโอดีนมากกว่า (40.6 ± 15.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานไตรเตรชัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสัดส่วนของเกลือต่อน้ำยาทดสอบไม่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้น สำหรับการวิเคราะห์ไอโอดีนโดยใช้ไอคิตที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัดพบว่าปริมาณไอโอดีน (29.7 ± 8.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ไม่แตกต่างกับวิธีไตรเตรชัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีนี้ใช้ปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น และการอ่านค่าสีที่ได้โดยอิสระ ดังกล่าวข้างต้น



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับวิธีไตรเตรชันของตัวอย่างที่ศึกษา

4. สรุปผลการศึกษา

ศึกษาปริมาณไอโอดีนในเกลือที่ผสมไอโอดีนด้วยเครื่องผสมทั้งแบบชุด (batch mixing) และแบบต่อเนื่อง (continuous mixing process) ด้วยวิธีมาตรฐานไตเตรชันและวิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนด้วยวิธีอื่น ๆ ได้แก่ วิธีไอริเตอร์แบบซิงเกิล 10 กรัม วิธีไอริเตอร์แบบ 1 ซ้อนตัก และวิธีไอคิดที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัด เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการศึกษา กับวิธีไตเตรชัน พบว่าวิธีการผสมเกลือแบบชุดด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวคู่ (double ribbon batch mixing) ผ่านเกณฑ์ในเรื่องของปริมาณไอโอดีน (20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวน (น้อยกว่าร้อยละ 10) ในขณะที่เครื่องผสมแบบต่อเนื่องส่วนใหญ่ไม่ผ่านเกณฑ์ร้อยละความแปรปรวน จึงเป็นสิ่งที่ส่วนงานที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ควรร่วมมือกันในการแก้ไขปัญหา เพื่อให้เกลือบริโภค มีคุณภาพมาตรฐาน ที่ส่งผลให้ผู้บริโภคได้รับไอโอดีนเหมาะสมกับความต้องการของร่างกาย

วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีไอริเตอร์และไอคิดแบบปกติพบว่าไม่เหมาะสมกับการตรวจสอบคุณภาพการผลิตเกลือเสริมไอโอดีน ณ จุดผลิต ส่วนวิธีการวิเคราะห์ไอโอดีนในเกลือที่เหมาะสมนอกเหนือจากวิธีไตเตรชัน ได้แก่ วิธีไอริเตอร์ควรเลือกใช้วิธีการแบบซิงเกิล 10 กรัม เพื่อเป็นตัวแทนของตัวอย่าง ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับวิธีมาตรฐาน แต่เครื่องไอริเตอร์ควรมีการสอบเทียบเป็นระยะ ๆ อย่างน้อยปีละครั้ง มีความเหมาะสมกับการควบคุมคุณภาพกับผู้ประกอบการขนาดกลาง ทั้งแบบชุด และแบบต่อเนื่อง และวิธีที่เหมาะสมนอกเหนือจากวิธีไตเตรชันอีกวิธีหนึ่ง คือ วิธีไอคิดที่ดัดแปลงการอ่านด้วยไม้บรรทัด พบว่ามีความสอดคล้องกับวิธีมาตรฐาน และปริมาณที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างอย่างนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเหมาะสมกับการควบคุมคุณภาพกับผู้ประกอบการขนาดเล็กที่ผลิต

แบบชุด ด้วยความตระหนักถึงว่าวิธีเหล่านี้เป็นวิธีกึ่งปริมาณเท่านั้น (semi-quantitative tests) สำหรับวิธีการไตเตรชันจัดเป็นวิธีมาตรฐานที่มีความเหมาะสมกับการควบคุมคุณภาพการผลิต และเหมาะสมกับการนำผลไปบังคับใช้ทางกฎหมาย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับรางวัลนำเสนอแบบบรรยายดีเด่นในการประชุมวิชาการโภชนาการแห่งชาติ ครั้งที่ 7 วันที่ 7-9 ตุลาคม 2556 ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพมหานคร

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (อย.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณสถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ สารเคมี และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ

6. รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2554, ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง เกลือบริโภค, ลงวันที่ 16 มีนาคม พ.ศ. 2554, กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- [2] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2553, ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง น้ำปลา (ฉบับที่ 2), ลงวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2553, กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- [3] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2553, ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง ผลิตภัณฑ์ปรุงรสที่ได้จากการย่อยโปรตีนของถั่วเหลือง (ฉบับที่ 2), ลงวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2553, กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- [4] สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2553, ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง น้ำเกลือปรุง

- อาหาร, ลงวันที่ 27 กันยายน พ.ศ. 2553, กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- [5] กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2555, สรุปผลการตรวจสอบการดำเนินงานโครงการควบคุมป้องกันโรคขาดสารไอโอดีนประจำปีงบประมาณ 2555, แหล่งที่มา : <http://www.anamai.moph.go.th/ewtadmin/ewt/audit/download/performance/2555/iodine55.pdf>, 16 เมษายน 2559.
- [6] หน่วยเคลื่อนที่เพื่อความปลอดภัยด้านอาหาร, 2553, คู่มือการเฝ้าระวังเกลือเสริมไอโอดีน, ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1, สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, กระทรวงสาธารณสุข, นนทบุรี.
- [7] The International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders (ICCIDD), 1995, Monitoring Universal Salt Iodization Programmes, January 1995, pp. 86-101.
- [8] Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2012, Official Methods of Analysis of the AOAC, Methods: 925.56, 19th Ed., In Horwitz, W. (Ed.), AOAC International, Maryland.
- [9] พิณทิพ รื่นวงษา และภิญโญ พานิชพันธ์, 2542, การพัฒนาชุดตรวจสอบภาคสนามสำหรับตรวจเกลือไอโอดีนใน Iodized Salt ในประเทศไทย, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, รายงานฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, รหัสโครงการ RDG3930003.
- [10] Panijphan, B. and Ruenwongsa, P., 2012, New Quantitative Method for Determination of Iodate in Salt, Institute for Innovative Learning, Mahidol University, Nakhon Pathom.
- [11] มหาวิทยาลัยมหิดล, 2556, ชุดเครื่องสำหรับวัดไอโอดีนในเกลือ (I-reader), แหล่งที่มา : <http://www.highents.com/admin/uploadFiles/file/20100906163213.pdf>, 16 เมษายน 2559.
- [12] Operating Manual, Infrared Moisture Determination Balance Model FD-610, 2014, The Kett Electric Laboratory, Tokyo.
- [13] Association of Official Analytical Chemists (AOAC), 2012, Guidelines for Standard Method Performance Requirements, Available Source: http://www.eoma.aoac.org/app_f.pdf, April 16, 2016.