

การศึกษาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในอาหารไทย
และปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้อง

**STUDIES OF IONIZABLE IRON IN THAI FOODS
AND ITS INFLUENCING FACTORS**

นภมณ ศรีตงกุล

Nopamon Sritongkul

มลลู่ ตันตาวีรพท์

Malulee Tuntawiroon

ฉวีวรรณ พัฒนจักร

Chaweewan Pattanachak

เบญจพร นาคสุขสกุล

Benjaporn Naksuksakul

ฤดี ปลีหจินดา

Rudee Pleehachinda

นุชรี ปุตระเศรณี

Nucharee Putraserani

ศิริพร จงจระศิริ

Siriporn Chongchirasiri

คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล

Faculty of Medicine, Siriraj Hospital, Mahidol University

บทคัดย่อ

การศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง พบว่า เป็นวิธีการที่ให้ความถูกต้องแม่นยำ ไม่ว่าจะเป็นการหาปริมาณภายในหรือระหว่างชุดของการวิเคราะห์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปรต่ำกว่าร้อยละ 10 ซึ่งในทางสถิติยอมรับว่าเป็นวิธีที่ใช้ได้ดี วิธีการคือ ทำสภาพให้คล้ายคลึงกับการย่อยในกระเพาะอาหารและลำไส้ แล้ววัดการแตกตัวของเหล็ก คิดเป็นร้อยละ โดยเทียบกับปริมาณของเหล็กกัมมันตรังสีทั้งหมดที่เติมลงไป อาหารตัวอย่างที่บดให้ละเอียดแล้ว จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์เปปซินในสภาพที่เป็นกรดด้วยกรดเกลือ $\text{pH} = 1.35$ แล้วเติมเหล็กกัมมันตรังสี (เหล็ก-59) ลงไป เมื่อครบเวลาแล้ว ปรับสภาพให้มี $\text{pH} = 7.5$ ด้วยอะซิเตทบัฟเฟอร์ เพื่อทำให้มีสภาพคล้ายคลึงกับส่วนต้นของลำไส้เล็ก สกัดเอาเหล็กส่วนที่สามารถจะถูกดูดซึมได้โดยใช้ บาโทพีแนนโทเรลีน แล้วไปวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสี หรือร้อยละของเหล็กที่สามารถจะถูกดูดซึมได้ เทียบกับเหล็กกัมมันตรังสีที่ใส่ลงไป ในอาหารทั้งหมด อาหารที่ใช้ทดลองการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร เมื่อนำมาหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง ให้ผลที่มีความสัมพันธ์กันได้ดี ทั้งการเปรียบเทียบกันในรูปร้อยละและในรูปอัตราส่วน

ผลการหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง พบว่า ปลาทูทอด น้ำส้มคั้นและเนื้อหมู ช่วยเพิ่มปริมาณการแตกตัวของเหล็ก แต่ถั่วเขียวลดปริมาณการแตกตัวของเหล็ก ซึ่งเหมือนกับผลการทดลองการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลองนี้ สามารถใช้เพื่อการคาดคะเนปริมาณเหล็กที่อาจจะถูกดูดซึมจากอาหารได้

ABSTRACT

An in vitro method for estimating availability of nonheme iron from food items was investigated. The coefficient of variation of intra and inter assay was less than 10 per cent which is statistically acceptable. The method involves simulated gastrointestinal digestion followed by radioactivity measurement of per cent ionizable iron which was extrinsically tagged by ^{59}Fe . Homogenized food sample was exposed to pepsin-HCl and extrinsically tagged with a radioisotope ^{59}Fe at pH 1.35. After incubation, the pH was adjusted to 7.5 by using acetate buffer. Ionizable iron was determined by the bathophenanthroline method. The per cent ionizable iron was calculated to compare to total added extrinsically tagged ^{59}Fe . Not only the per cent ionizable iron in a test meal but also its ratio compared to basal diet was shown to correlate highly with per cent and ratio iron absorption from the same diets observed in the adult males. Ionizable iron was shown to increase in presence of fish, orange juice and pork but to decrease in presence of mung bean. This observation was similar to the effect of these factors on iron absorption in human subjects. Thus this method has proved to be valuable as an in vitro method for predicting the availability of iron from food.

คำนำ

โรคโลหิตจางเนื่องจากขาดธาตุเหล็ก เป็นปัญหาทางโภชนาการที่สำคัญในประเทศที่กำลังพัฒนาทั่วโลก สำหรับประเทศไทย จากการตรวจค่าฮีมาโตคริตของกุ่มประชากรทั่วทุกภาค พบอุบัติการณ์โลหิตจาง ตั้งแต่ร้อยละ 11 ในจังหวัดสระบุรี จนถึงร้อยละ 89 ในจังหวัดอุบลราชธานี⁴⁷ ภาวะการขาดธาตุเหล็กเป็นปัญหาที่พบบ่อยมากในเด็กและผู้หญิง¹¹ Sturgeon⁴⁴ รายงานว่า ถ้าเด็กเป็นโรคโลหิตจางเนื่องจากการขาดเหล็ก จะทำให้ระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง ความต้านทานโรคลดลง และทำให้อัตราการตายในเด็กสูงขึ้น หญิงมีครรภ์ที่เป็นโรคโลหิตจางจะทำให้อัตราการเสี่ยงต่อการคลอดก่อนกำหนด รวมทั้งอัตราการตายของมารดาและทารกสูงขึ้น Viteri และ Torun⁴⁶ รายงานว่า ภาวะการขาดเหล็กในผู้ใหญ่ทำให้ความสามารถในการทำงานลดลง เป็นการบั่นทอนเศรษฐกิจของประเทศ

สาเหตุที่ทำให้ร่างกายได้รับธาตุเหล็กไม่เพียงพอ อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการสูญเสียโลหิตแบบเรื้อรัง และ/หรือ มีการดูดซึมเหล็กเข้าสู่ร่างกายไม่เพียงพอ การเสียเลือดแบบเรื้อรังนั้น อาจจะเป็นไปได้โดยไม่รู้ตัว เช่น มีพยาธิปากขอ ซึ่งพบมากในประเทศไทย⁴⁵ โดยเฉพาะในเด็กพบถึงร้อยละ 90¹ การเป็นแผลในกระเพาะอาหาร ริดสีดวงทวาร หรือการเสียเลือดทางประจำเดือน เป็นต้น สำหรับการดูดซึมเหล็กเข้าสู่ร่างกายที่ไม่เพียงพอ นั้น อาจเกิดจากในอาหารมีปริมาณเหล็กน้อยเกินไป หรือมีเหล็กอยู่ในปริมาณที่เพียงพอ แต่อยู่ในรูปที่ไม่เหมาะสมต่อการดูดซึม หรือเนื่องมาจากส่วนประกอบของอาหาร ซึ่งอาจจะมีตัวยับยั้งการดูดซึมเหล็กผสมอยู่มาก หรือมีตัวเพิ่มการดูดซึมเหล็กผสมอยู่น้อย

สำหรับสาเหตุที่มีการดูดซึมเหล็กน้อยในกรณีที่มีปริมาณเหล็กในอาหารเพียงพอ นั้น เป็นสิ่งที่ควรศึกษาและแก้ปัญหาซึ่งสามารถทำได้หลายทาง เช่น การให้เหล็กทดแทน (Supplementation) การเสริมธาตุเหล็กลงในอาหาร (Fortification) ซึ่งเป็นทางตรง และการแนะนำส่งเสริมวิธีบริโภคอาหารที่เพิ่มการดูดซึมเหล็ก (Food modification) ซึ่งเป็นทางอ้อม การแก้ปัญหาโดยวิธีทางอ้อมนี้ เป็นการให้เหล็กที่มีอยู่แล้วในอาหารให้เป็นประโยชน์ โดยไม่ต้องเติมจากภายนอกซึ่งเป็นวิธีการที่สิ้นเปลืองกว่า การศึกษาหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ รวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลไม่ว่าจะเป็นส่วนช่วยเพิ่มหรือลดปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ ย่อมมีประโยชน์ในการนำผลมาช่วยแก้ไข้ปัญหา และส่งเสริมแนะนำการบริโภคให้เป็นไปในทางที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ยังไม่เคยมีผู้ใดทำมาก่อนในประเทศไทย สำหรับในต่างประเทศ มีผู้ทำการวิจัยมาแล้ว เช่น Jacobs²⁶ ได้คิดค้นวิธีการสกัดเอาเหล็กที่อยู่ในรูปซึ่งสามารถละลายได้ออกมาจากอาหารจำนวน 25 ชนิด และทำภายใต้สภาพที่คล้ายคลึงกับสภาพทางกายภาพของกระเพาะอาหาร พบว่า ส่วนใหญ่ของเหล็กที่สกัดออกมาได้นั้น จะมีปริมาณน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนเหล็กทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร ปริมาณของเหล็กที่จะถูกสกัดออกมานั้นขึ้นอยู่กับวิธีการปรุงอาหาร และรวมทั้งการมีปัจจัยอื่น ๆ ร่วมอยู่ในอาหารนั้นด้วย Jacobs กล่าวว่า ปริมาณเหล็กทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหารมิใช่ว่าจะเป็นส่วนที่ถูกดูดซึมได้ทั้งหมด

Hallberg²² ได้คิดค้นวิธีการสำหรับวัดหาปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมโดยวิธีภายนอก ร่างกาย และใช้สารกัมมันตภาพรังสีเป็นตัวช่วยวัด ซึ่งทำการทดลองในภาวะเดียวกับสภาพทางกายภาพของกระเพาะอาหารในร่างกาย Hallberg ได้ทำการทดลองในอาหารหลายประเภท รวมทั้งอาหารที่มีเหล็กจากภายนอกมาปะปนด้วย พบว่า วิธีการแบบภายนอกในร่างกายนี้ สามารถใช้หาปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมจากเหล็กทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหารได้เป็นอย่างดี

Miller³⁰ ได้ศึกษาวิธีการสำหรับวัดหาปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้โดยวิธีภายนอก ร่างกาย แต่อยู่ในสภาพที่คล้ายคลึงกับสภาพทางกายภาพของกระเพาะอาหาร และถ้าใส่ภายในร่างกายคนได้ทดลองถึงผลของปัจจัยที่จะมีส่วนกระตุ้น หรือยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพของเหล็กในอาหารให้อยู่ในรูปที่จะดูดซึมได้

Schricker⁴¹ ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของการดูดซึมเหล็กจากอาหาร โดยใช้วิธีวัดการดูดซึมเหล็กในร่างกายของคน เปรียบเทียบกับการหาปริมาณของเหล็กที่จะดูดซึมโดยวิธีภายนอกร่างกาย ตามวิธีของ Miller พบว่า ให้ผลเปรียบเทียบที่มีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี นอกจากนี้ก็ยังทำการเปรียบเทียบผลการดูดซึมเหล็กในร่างกายคนกับในหนูทดลอง ซึ่งพบว่า ไม่มีความสัมพันธ์กันเลย

การดูดซึมเหล็กจากอาหาร และส่วนประกอบของอาหารนั้น เป็นการยากที่จะคาดการณ์ล่วงหน้าว่า จะได้รับเหล็กดี หรือ เลว มากน้อยเพียงใด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบเหล็ก ปริมาณของเหล็ก ที่มีอยู่ รวมทั้งส่วนประกอบของอาหารที่แตกต่างกัน ทั้งปริมาณและคุณภาพของอาหารแต่ละจานที่รับประทานในแต่ละมื้อ รวมทั้งขึ้นอยู่กับสมรรถภาพของการดูดซึมเหล็กของแต่ละบุคคลด้วย^{21,23,27} ดังนั้น เพื่อให้มีแนวทางพอที่จะคาดการณ์ได้ว่า เหล็กในอาหารแต่ละจานที่รับประทานนั้น มีโอกาสที่จะถูกดูดซึมได้มากหรือน้อยเพียงใด จึงทำการทดลองโดยใช้วิธีทางเคมีและกัมมันตรังสีในหลอดทดลอง ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และประหยัดกว่าการทำการทดลองการดูดซึมจากอาหารในคน

อุปกรณ์และวิธีการ

การวิเคราะห์เหล็ก

การหาปริมาณเหล็กทั้งหมด (Total iron): ใช้วิธีของ Bjorn Rasmussen และคณะ³ มีหลักการคือ อาหารจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 600°C. แล้วนำมาละลายในกรดเกลือ จากนั้นเหล็กจะรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับบาโทฟีแนนโทรลีน ซัลโฟเนท (Bathophenanthroline sulfonate) ให้สีชมพู ซึ่งจะวัดความเข้มของการดูดแสงที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร แล้วเปรียบเทียบความเข้มกับสารละลายเหล็กมาตรฐาน

การหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (Ionizable Fe): หลักการคือ บดอาหารให้ละเอียด แล้วนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เปปซินในสภาพที่เป็นกรดด้วยกรดเกลือ แล้วเติมเหล็กกัมมันตรังสี (เหล็ก 59) เป็นเทอร์เซอร์ (tracer) สำหรับวัดปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ลงไปหลังจากที่ตั้งไว้ใน Shaking water bath 37°C. ครบ 30 นาที แล้วนำมาเติมอะซิเตทบัฟเฟอร์ เพื่อทำให้สภาพคล้ายคลึงกับส่วนต้นของลำไส้เล็ก แล้วสกัดเอาเหล็กส่วนที่สามารถจะถูกดูดซึมได้โดยใช้บาโทฟีแนนโทรลีน นำไปวัดปริมาณรังสีหา ร้อยละของเหล็กที่สามารถจะถูกดูดซึมได้ เทียบกับเหล็กกัมมันตรังสีที่ใส่ลงไปในอาหารทั้งหมด วิธีที่ใช้นี้ ดัดแปลงมาจากวิธีของ Rao และ Prabhavathi³⁶ โดยตัดขั้นตอนการกรอง เพราะกากอาหารทำให้เสียเวลา และเพิ่มการใช้เหล็กกัมมันตรังสี เป็นตัวเทอร์เซอร์

การวิเคราะห์สารที่มีผลต่อการดูดซึมเหล็ก

การวิเคราะห์หาปริมาณวิตามินซี: ใช้วิธีของ Shich and Sweet⁴² หลักการคือ วิตามินซีจะรีดิวซ์สารละลาย Copper (II)-2, 2'-biquinoline ได้สารละลายสีม่วงของ Copper (I)-2, 2'-biquinoline complex ในบัฟเฟอร์ อะซิโตน หาปริมาณได้โดยวัดความเข้มของการดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร หาปริมาณวิตามินซีในอาหารได้โดยนำอาหารที่บดละเอียดแล้ว 5 ก. มาเติมบัฟเฟอร์ของฟอสเฟต กรดซิตริกที่เข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร pH 3.0 จำนวน 25 มล. บัฟเฟอร์นี้จะต้องผ่านก๊าซไนโตรเจนก่อน วิตามินซีในอาหารจะละลายอยู่ในบัฟเฟอร์ นำสารละลายจำนวน 1 มล. มาเติมสารละลาย Copper (II)-2, 2'-biquinoline จำนวน 20 มล. นำไปวัดความเข้มของการดูดแสงที่มีความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร หาปริมาณวิตามินซีโดยเทียบกับสารละลายมาตรฐานของ L-ascorbic acid

การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน: ใช้วิธี Micro-kjeldahl¹⁸ หลักการคือย่อยสารอินทรีย์ไนโตรเจนในโปรตีนให้อยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ไนโตรเจน โดยไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียที่ละลายในกรดกำมะถันได้เป็นแอมโมเนียมซัลเฟต แล้วจึงกลั่นโดยให้ทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป เพื่อปล่อยให้อะมโมเนียออกมาอยู่ในกรดบอริก แล้วหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธีไตเตรท (Titration) ด้วยกรดเกลือที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน

การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต (phytate): ใช้วิธีของ Oberleas³³ หลักการคือ ตกตะกอนฟอสเฟตให้อยู่ในรูปของเฟอริกฟอสเฟต ด้วยสารละลายเฟอริกคลอไรด์ เปลี่ยนตะกอนที่ได้ให้เป็นโซเดียมฟอสเฟต หลังจากนั้นละลายตะกอนในกรดกำมะถันเข้มข้น แล้วนำไปไฮโดรไลส์ด้วยกรดดินประสิวเข้มข้นหรือกรดเพอร์คลอริก 65% นำสารละลายที่ได้จากการไฮโดรไลส์ไปหาปริมาณฟอสเฟต ซึ่งจะอยู่ในรูปของอินโนซิทอล ฟอสเฟต (Inositol phosphate) ตามวิธีการของ Lindberg และ Ernster²⁸

การศึกษาการดูดซึมเหล็กจากอาหาร

การดูดซึมเหล็กจากอาหาร: ใช้วิธีของ Cook¹² โดยแบ่งกลุ่มทดลองเป็น 2 กลุ่ม แล้วให้รับประทานอาหารตามที่กำหนด (ตารางที่ 1)

การเจาะเลือด: ก่อนเริ่มการทดลอง จะมีการเจาะเลือดเพื่อเป็นกลุ่มควบคุม (control) เมื่อผู้ทดลองรับประทานอาหารตามกำหนดแล้ว จะมีการเจาะเลือดในวันที่ 14 ก่อนที่จะรับประทานมื้อ ค และเจาะเลือดอีกครั้งในวันที่ 28 เลือดที่เก็บนี้จะนำมาวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก 55 และ เหล็ก 59 ในเม็ดเลือดแดง เพื่อหาค่าปริมาณของเหล็กที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย

การวิเคราะห์เลือดหาปริมาณเหล็กกัมมันตรังสี

ใช้วิธีของ Eakins และ Brown¹⁷ นำตัวอย่างเลือด 10 มล. ไปสลายสารอินทรีย์ด้วยกรดกำมะถันและกรดดินประสิวเข้มข้น จนได้สารละลายสีเหลืองส้ม นำสารละลายที่ได้ไปออกซิไดซ์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% จนได้สารละลายใส นำสารละลายนี้ไปตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จนได้ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ละลายตะกอนด้วยกรดฟอสฟอริกเข้มข้น แล้วตกตะกอนเหล็กด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์ในเอทิลแอลกอฮอล์ ได้ตะกอนสีขาวของเฟอริกฟอสเฟต นำตะกอนไปตรวจปริมาณรังสีโดยใช้ Liquid scintillant (Aquasol) แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณรังสีเหล็ก 55/เหล็ก 59 ด้วยเครื่องวัดรังสี

ผล

1. การศึกษาความถูกต้องของวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีและรังสี เพื่อหาปริมาณการแตกตัวของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง (*in vitro*)

จากการทำ Quality control เพื่อหาความถูกต้องของวิธีการทั้ง Intra และ Inter assay ตามจำนวนครั้งที่เพียงพอ ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปร (Coefficient of variation) ไม่เกินร้อยละ 10 (ตารางที่ 2 และ 3)

2. การทดลองหาปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (*in vitro*) ในสารละลายของสารประกอบเหล็ก ชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน

สารประกอบเหล็กที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิด คือ FeSO_4 , เหล็กเชิงซ้อน (FeSO_4 : SHMP:NaHSO₄ = 10:8:5), FeCl_3 และ FeNaEDTA ปริมาณของเหล็กที่ใช้เริ่มตั้งแต่ 0.5 มก.* ถึง 20 มก. พบว่า สารประกอบเหล็กในสภาพของสารละลายที่ให้ปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ดีคือ FeSO_4 และเหล็กเชิงซ้อนซึ่งเป็นเหล็กในรูปของ Fe^{+2} รองลงมาคือ FeCl_3 และ FeNaEDTA ซึ่งเป็นเหล็กในรูป Fe^{+3} ในปริมาณที่สูงกว่า 600 มก.ขึ้นไป FeCl_3 จะให้เหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ดีกว่าในเหล็กเชิงซ้อน FeSO_4 และ FeNaEDTA ตามลำดับ (รูปที่ 1, ตารางที่ 4 และ 5)

* มก. = ไมโครกรัม

3. การทดลองผลของวิตามินซีในการส่งเสริมปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ ของสารประกอบเหล็ก FeSO_4 และ FeNaEDTA ในน้ำ

พบว่าสารละลายของเหล็กในรูป FeSO_4 ในน้ำ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเมื่อเติมวิตามินซีลงไป ไม่ว่าจะเป็ปริมาณเท่าใดก็ตาม (รูปที่ 2, ตารางที่ 6 และ 7) สำหรับสารละลายของเหล็กในรูป FeNaEDTA ในขนาด 60 และ 400 มก. ในน้ำ เมื่อเติมวิตามินซีลงไปจะช่วยเพิ่มการดูดซึมของเหล็ก (รูปที่ 2 และ ตารางที่ 8)

4. การทดลองผลของไข่ไก่ในการขัดขวาง (inhibit) ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ของสารประกอบ FeSO_4 , FeCl_3 และ FeNaEDTA ในน้ำ

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่า เมื่อเติมไข่แดงลงไปใต้น้ำที่มีสารประกอบเหล็ก FeSO_4 และ FeCl_3 ทำให้ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึม ลดลงจากเดิม ซึ่งให้ผลตรงกันข้ามกับการเติมไข่ขาวลงไป เพราะไข่ขาวทำให้ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของสารประกอบเหล็ก FeNaEDTA ในน้ำ ทั้งไข่ขาวและไข่แดงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

5. การวิเคราะห์อาหารกลุ่มต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้และปริมาณเหล็กทั้งหมดของอาหารกลุ่มต่าง ๆ เช่น พวกรับคาร์โบไฮเดรต ผัก ผลไม้ โปรตีนพืชและโปรตีนสัตว์ รวมทั้งการวิเคราะห์หาวิตามินซีและฟิเตท ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจมีผลส่งเสริมและขัดขวางต่อการดูดซึมของเหล็ก พบว่าในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว มีปริมาณของเหล็กและการแตกตัวไม่สูงมาก พบมีปริมาณฟิเตทเล็กน้อย สำหรับกลุ่มพืช ผัก ไม่พบฟิเตท แต่ในพริกชี้หนู พบมีปริมาณวิตามินซีสูงมาก และมีการแตกตัวของเหล็กมากกว่าพืชผักอื่น ๆ ในกลุ่มผลไม้ พบวิตามินซีสูงในมะละกอ ส้มเขียวหวาน และสับปะรด การแตกตัวของเหล็กก็สูงด้วย สำหรับกลุ่มโปรตีนพืช พบมีปริมาณฟิเตทสูงและปริมาณของเหล็กค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในถั่วเหลือง แต่การแตกตัวของเหล็กมีปริมาณต่ำ สำหรับกลุ่มโปรตีนสัตว์ การแตกตัวของเหล็กสูงพอ ๆ กันทั้งใน เนื้อไก่ วั ว หมู ปลา และตับ ปริมาณของเหล็กทั้งหมด พบสูงมากในตับเมื่อเทียบกับเนื้อสัตว์ต่าง ๆ สำหรับไข่ไก่ พบว่าไข่ขาวให้ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมสูงกว่าไข่แดง แต่ปริมาณเหล็กทั้งหมดต่ำกว่า

6. คุณภาพของอาหารที่ใช้ในการทดลอง

เพื่อศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ไวตามินซี โปรตีนพืช และโปรตีนสัตว์ต่อการเพิ่ม หรือลดความสามารถในการดูดซึมเหล็กในคน (*in vivo*) และต่อปริมาณการแตกตัวของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง (*in vitro*) จึงได้เตรียมอาหารขึ้น 5 ประเภท ตั้งแต่ 1-5 โดยมีปริมาณและส่วนประกอบแสดงไว้ในตารางที่ 11 และ 12 ผลการวิเคราะห์อาหารทั้ง 5 ประเภทแสดงในตารางที่ 13

7. สถานภาพทางเหล็กของอาสาสมัคร

คัดเลือกอาสาสมัครเฉพาะบุคคลที่มีสุขภาพสมบูรณ์ และมีสถานภาพทางเหล็กปกติ ตารางที่ 14 แสดงผลการวิเคราะห์เลือดของอาสาสมัครชาย จำนวน 23 คน โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก 11 คน กลุ่มที่สอง 12 คน ทั้งหมดมีอายุเฉลี่ย 30 ปี ส่วนสูง 164.8 ซม. น้ำหนัก 57.4 กก. ปริมาณเม็ดเลือดแดงอัดแน่น ร้อยละ 38.4 ปริมาณฮีโมโกลบิน 13.8 ก.% ปริมาณของเลือดทั้งหมด 4439.5 มล. ปริมาณของโปรโตพorphyrin ในเม็ดเลือดแดง (Red cell protoporphyrin) 65.35 มกก.%

8. การศึกษาผลของโปรตีนจากปลาและไวตามินซีในน้ำส้มคั้นต่อการดูดซึมเหล็กในอาหารพื้นฐาน

จากการทดลองในอาสาสมัครกลุ่มที่ 1 พบว่า โปรตีนจากปลาและไวตามินซีในน้ำส้มคั้นให้ร้อยละของการดูดซึมเหล็กที่สูงกว่าอาหารพื้นฐาน โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึมเหล็กในอาหารพื้นฐานเท่ากับ 12.89 ในอาหารที่มีโปรตีนจากปลาเท่ากับ 14.99 และในอาหารที่มีไวตามินซีจากน้ำส้มคั้นเท่ากับ 31.77 ดังแสดงในตารางที่ 15 และเมื่อปรับค่าการดูดซึมเหล็กของ Reference dose เป็นร้อยละ 40 จะได้ค่าการดูดซึมเหล็กในอาหารพื้นฐานเป็น 10.46 ในอาหารที่มีโปรตีนจากปลาเป็น 11.64 และอาหารที่มีไวตามินซีจากน้ำส้มคั้นเป็น 23.85 (ตารางที่ 16)

9. การศึกษาผลของโปรตีนพืชจากถั่วเขียว และโปรตีนสัตว์จากเนื้อหมูต่อการดูดซึมเหล็กในอาหารพื้นฐาน

จากการทดลองในอาสาสมัครกลุ่มที่ 2 พบว่า โปรตีนพืชจากถั่วเขียวให้ร้อยละของการดูดซึมเหล็กที่ต่ำกว่าอาหารพื้นฐาน และโปรตีนสัตว์จากเนื้อหมูให้ร้อยละของการดูดซึมเหล็กที่สูงกว่าอาหารพื้นฐาน โดยค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึมเหล็กในอาหารพื้นฐาน อาหารที่มีถั่วเขียว และอาหารที่มีเนื้อหมูเป็น 8.87, 5.24 และ 22.23 ตามลำดับ (ตารางที่ 17) สำหรับค่าการดูดซึมเหล็กในอาหารทั้ง 3 ประเภทในตารางที่ 18 นั้น เป็นค่าที่ปรับการดูดซึมเหล็กของ Reference dose เป็นร้อยละ

40 และให้ค่าเฉลี่ยร้อยละของการดูดซึมเหล็กในอาหารพื้นฐานเป็น 10.47 ในอาหารที่มีถั่วเขียวเป็น 5.93 และในอาหารที่มีเนื้อหมูเป็น 27.40

10. การศึกษาหาปริมาณการแตกตัวของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง

นำอาหารทั้ง 5 ประเภท ที่เตรียมขึ้นสำหรับทดลองในอาสาสมัครมาทำการทดลอง พบว่าอาหารที่มีโปรตีนจากปลา ไวตามินซีจากน้ำส้มคั้น และโปรตีนจากเนื้อหมูให้ร้อยละของการแตกตัวของเหล็กสูงกว่าอาหารพื้นฐาน แต่อาหารที่มีโปรตีนพืช (ถั่วเขียว) ให้ร้อยละของการแตกตัวของเหล็กต่ำกว่าอาหารพื้นฐาน โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละของการแตกตัวของเหล็กในอาหารพื้นฐาน อาหารที่มีโปรตีนจากปลา อาหารที่มีไวตามินซีจากน้ำส้มคั้น อาหารที่มีโปรตีนจากถั่วเขียว และอาหารที่มีโปรตีนจากเนื้อหมูเป็น 24.49, 49.28, 88.65, 23.10 และ 74.53 ตามลำดับ (ตารางที่ 19)

11. การเปรียบเทียบผลการทดลองการดูดซึมเหล็กจากอาหารในอาสาสมัคร และปริมาณการแตกตัวของเหล็กที่มีโอกาสจะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง

ผลการทดลองในอาสาสมัคร และในหลอดทดลอง ได้นำมาเปรียบเทียบกันทั้งในรูปของอัตราส่วนและร้อยละ พบว่า มีสหสัมพันธ์ (correlation) ที่ดี ตารางที่ 20 และรูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบในรูปของอัตราส่วนระหว่างการดูดซึมเหล็กจากอาหารในอาสาสมัคร และปริมาณการแตกตัวของเหล็กที่มีโอกาสจะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง ได้ค่าความสัมพันธ์ $r = 0.9192$ สำหรับการเปรียบเทียบในรูปของร้อยละ ตารางที่ 21 และรูปที่ 4 ได้ค่าความสัมพันธ์ $r = 0.9197$

วิจารณ์

วิธีการที่ใช้ในการหาปริมาณการแตกตัวของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลองได้ให้ความถูกต้อง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความผันแปรของ Intra และ Inter assay น้อยกว่า 10% วิธีการนี้ไม่ได้ใช้ Pancreatin แต่ใช้การเพิ่ม pH ด้วยอะซิเตทบัฟเฟอร์ ให้มีสภาพคล้ายคลึงกับส่วนต้นของลำไส้เล็ก โดยดำเนินการตามวิธีการของ Rao และ Prabhavathi ซึ่งกล่าวว่า Pancreatin ไม่มีผลต่อการดูดซึมและการละลายของเหล็ก³⁶ และจากการศึกษาของ Bothwell พบว่า Pancreatin น้ำดีและน้ำย่อยภายในลำไส้เล็กไม่มีผลโดยตรงต่อการดูดซึมเหล็ก⁵ ดังนั้น วิธีการนี้จึงเป็นที่ยอมรับและเป็นวิธีการที่ใช้ทดลองต่อไป

การศึกษาเพื่อดูผลของปริมาณ (dosage) และวาเลนซี (valency) ของเหล็กในการแตกตัวเพื่อหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลองนั้น ได้ใช้สารประกอบเหล็ก 4 ชนิด คือ FeSO_4 , เหล็กเชิงซ้อน ($\text{FeSO}_4 : \text{SHMP} : \text{NaHSO}_4 = 10 : 8 : 5$), FeCl_3 และ FeNaEDTA พบว่า ความสัมพันธ์

ระหว่างปริมาณเหล็กที่ใช้ทดลอง ตั้งแต่ 0.5 มก. ถึง 20 มก. กับปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้จะลดลงเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น ผลที่ได้นี้เหมือนกับผลการทดลองของ Smith⁴³, Bothwell⁶ และ Bonnet⁴

โดยทั่วไป เหล็กที่มีวาเลนซ์ 2 จะให้ปริมาณและร้อยละของการดูดซึมมากกว่าวาเลนซ์ 3^{31,32} ในการทดลองนี้ พบว่า เหล็กที่มีวาเลนซ์ 2 ซึ่งได้แก่ FeSO₄ และเหล็กเชิงซ้อนในปริมาณที่ต่ำกว่า 600 มก. ให้ทั้งปริมาณและร้อยละของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้มากกว่าเหล็กที่มีวาเลนซ์ 3 ซึ่งได้แก่ FeCl₃ และ FeNaEDTA แต่ในปริมาณที่สูงกว่า 600 มก. ผลมิได้เป็นไปตามหลักทั่วไป คือพบว่า สารประกอบเหล็กในรูปเหล็กเชิงซ้อน และ FeCl₃ ให้ปริมาณและร้อยละของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้มากกว่า FeSO₄ ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ของ FeSO₄ ไม่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากขีดจำกัดของความสามารถในการละลายของ FeSO₄ เมื่อเทียบกับ สารประกอบเหล็กในรูปอื่น ๆ ซึ่งละลายได้ดีกว่าเช่น เหล็กเชิงซ้อนมี SHMP และ NaHSO₄ เป็นตัวช่วย ป้องกันไม่ให้ FeSO₄ ตกตะกอน และ FeCl₃ ซึ่งมีความสามารถในการละลายสูงกว่า FeSO₄ วิธีนี้ก็สามารถใช้หาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในอาหาร เพราะปริมาณเหล็กในอาหารที่รับประทานแต่ละมื้อของคนไทย จะไม่เกิน 10 มก.³⁴ ซึ่งในส่วนของตัวอย่างอาหารที่นำมาวิเคราะห์ จะมีปริมาณเหล็กอยู่ไม่เกิน 100 มก. จึงเป็นช่วงที่ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการละลายของเหล็ก ไม่ว่าจะอยู่ในรูปใด ๆ สำหรับสารประกอบเหล็กในรูป FeNaEDTA นั้น จำนวนร้อยละ และปริมาณของการดูดซึมน้อยกว่าเหล็กทุกชนิด ผลที่ได้เหมือนกับงานของ Brise⁷ และ Cook¹⁴

ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของไวตามินซีหลายคน และพบว่าไวตามินซีเป็น powerful reductant ของเหล็ก มีส่วนช่วยเพิ่มการดูดซึมเหล็กพวก nonheme ในอาหาร^{25,37,38,39}

Conrad¹⁰ กล่าวว่า ไวตามินซีเป็นตัวคีเลเตอร์ (Chelator) ช่วยทำให้เหล็กในรูป Ferric ละลายได้มากกว่า Ferrous สำหรับการทดลองผลของไวตามินซีในการส่งเสริมปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมของ สารประกอบ FeSO₄ และ FeNaEDTA ในน้ำ ให้ผลเช่นเดียวกัน คือ ไวตามินซีช่วยเพิ่มปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมของ FeNaEDTA ให้มากขึ้น โดยที่ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมของ FeSO₄ เลย

จากการทดลองผลของไข่ไก่ ในการขัดขวางการแตกตัวของสารประกอบเหล็ก FeSO₄ และ FeCl₃ พบว่า ไข่แดงลดปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึม ซึ่งได้ผลเหมือนกับการศึกษาของ Cook¹³, Callender⁸ และ Monsen³¹ ที่กล่าวว่า ไข่แดงมีฟอสโฟโปรตีน (phosphoprotein) ซึ่งเป็นตัวยับยั้ง (inhibitor) การดูดซึมเหล็ก nonheme ในอาหาร สำหรับไข่ขาว พบว่าช่วยเพิ่มปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึม เหมือนกับผลการศึกษาทาง *in vitro* ของ Miller³⁰ และการศึกษาทาง *in vivo* ของ Peters³⁵

สำหรับ FeNaEDTA นั้น ไม่พบความเปลี่ยนแปลงต่อการแตกตัวของเหล็กเลย ไม่ว่าจะเป็ นไข่ขาวหรือไข่แดง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก EDTA เป็นตัวคีเลเตอร์ป้องกันเหล็กไม่ให้ถูกยับยั้งโดยฟอสโฟ- โปรตีนที่จัดเป็นตัวขัดขวางที่สำคัญในไข่แดง²⁰ และไม่สามารถถูกส่งเสริมได้ด้วยอัลบูมิน (albumin) ในไข่ขาว

จากการวิเคราะห์อาหารกลุ่มต่าง ๆ พบพืชเคทในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตทั้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว แต่ไม่พบในผักและผลไม้ ทั้งนี้อาจจะเล็ดลอดไปได้ เพราะวิธีการที่ใช้หาปริมาณพืชเคทนี้ เป็นวิธีสำหรับการวิเคราะห์แบบ Macro ไม่สามารถตรวจพบได้ถ้ามีปริมาณน้อย ๆ นอกจากนี้ ปริมาณพืชเคทที่หาได้ยังไม่เฉพาะเจาะจงเพราะเป็นการตกตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการตกตะกอนพวกสาร- ประกอบฟอสฟอรัสทุกชนิด ในการวิจัยนี้ จำเป็นต้องใช้วิธีนี้ เพราะยังไม่มีวิธีใดเลยที่สามารถหาปริมาณ พืชเคทที่เฉพาะเจาะจง และในปริมาณขนาดไมโครกรัมได้

อาหารประเภทผักและผลไม้ พบมีปริมาณไวตามินซีสูง เหมาะสำหรับการช่วยเพิ่มการ ดูดซึมเหล็กจากอาหาร อาหารประเภทโปรตีนพืช พบมีพืชเคทสูงซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของตัวขัดขวางการดูดซึม เหล็กจากอาหาร จากผลการวิเคราะห์นี้ ควรนำมาศึกษาต่อทั้งส่วนประกอบของอาหารแต่ละชนิด (individual item) และอาหารทั้งมื้อ (whole meal) เพื่อดูผลของการเพิ่มหรือลดปริมาณของเหล็กที่จะถูก ดูดซึมได้ในหลอดทดลอง รวมทั้งความสามารถในการดูดซึมเหล็กในคนด้วย เพื่อให้การทดลองมีความ แปรปรวนระหว่างรายน้อยที่สุด จึงได้เติมจำนวนเหล็กเข้าไปเสริมจำนวนเหล็กที่มีอยู่ในอาหารให้เท่ากันคือ 3 มก. (ตารางที่ 12) สำหรับกลุ่มที่มีการเปรียบเทียบผลของโปรตีนทั้งจากพืชและสัตว์ ได้จัดให้มีปริมาณ โปรตีนใกล้เคียงกันที่สุด นอกจากนี้ปริมาณแคลอรีของอาหารทั้ง 5 ประเภท ที่ใช้ทำการทดลองนี้ ก็มีปริมาณ ไม่แตกต่างกันมากนัก

ผลการทดลองการดูดซึมเหล็กจากอาหารในอาสาสมัครชายปกติ พบว่าปลาช่วยเพิ่มการดูดซึม เหล็ก^{15,29} แต่ไม่สูงมาก ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากวิธีการเตรียมอาหาร เช่น การทอด นึ่ง หรือต้มยำ เป็นต้น⁴⁰ ไวตามินซีในน้ำส้มคั้นช่วยเพิ่มการดูดซึมเหล็กได้ผลเช่นเดียวกับงานของ Callender⁹ สำหรับ ถั่วเขียวที่จัดเป็นโปรตีนพืช ลดการดูดซึมเหล็กในอาหารเหมือนกับผลงานของ Hallberg²⁴ และ Cook¹⁶ เนื้อหมูที่จัดเป็นโปรตีนสัตว์ ช่วยเพิ่มการดูดซึมเหล็กในอาหาร ให้ผลเหมือนกับงานของ Bjorn-Rasmussen² และ Cook¹⁵

อาหารที่ใช้ทดลองการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร เมื่อนำมาหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ ในหลอดทดลอง ให้ผลเช่นเดียวกันคือ ปลาทุทอด ไวตามินซีในน้ำส้มคั้นและเนื้อหมู ช่วยเพิ่มปริมาณ ร้อยละของการแตกตัวของเหล็ก สำหรับถั่วเขียวจะลดปริมาณร้อยละของการแตกตัวของเหล็ก เมื่อ เปรียบเทียบกับอาหารพื้นฐาน

การเปรียบเทียบผลการทดลองการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร และปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง ให้ผลที่มีสหสัมพันธ์ที่ใช้ได้ แต่ยังคงจำเป็นต้องรวบรวมข้อมูลเช่นนี้ เพิ่มเติมให้เพียงพอต่อไป

สรุป และข้อเสนอแนะ

วิธีวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง ซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่าการหาปริมาณการดูดซึมเหล็กในคน เพราะถ้าทำการทดลองในคนจะยุ่งยาก สิ้นเปลืองและใช้เวลานานกว่า นอกจากนี้ยังมีความจำกัดในตัวอย่างอาหารที่ใช้ในการทดลอง เพราะไม่สามารถทำการศึกษาได้ที่หลาย ๆ ตัวอย่าง

ข้อเสนอแนะคือ ควรจะเพิ่มเติมข้อมูลให้มากขึ้น เพื่อยืนยันวิธีการวิเคราะห์ในหลอดทดลองให้เป็นที่ยอมรับ และสามารถนำมาใช้เพื่อคาดการณ์ปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ ซึ่งอาจนำมาทดแทนการทดลองการดูดซึมเหล็ก ประโยชน์ของผลงานวิจัยนี้ ก็เพื่อประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกชนิดของอาหารที่มีปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้สูง และสามารถนำวิธีการมาใช้ศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่จะมีผลกระทบต่อทั้งด้านการยับยั้งและการส่งเสริมการดูดซึมเหล็ก เป็นการช่วยปรับปรุงภาวะโภชนาการของเหล็กในอาหารให้ดีขึ้น เพื่อแก้ปัญหาโรคโลหิตจางจากการขาดธาตุเหล็ก และอาจจะใช้เป็นแนวทางเพื่อถ่ายทอดความรู้ในด้านการเสริมธาตุเหล็กให้กับกลุ่มประชากรเป้าหมาย และผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ต่อไป

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือทางวิชาการจาก ศาสตราจารย์ นายแพทย์ รมัทร สุวรรณิก และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยและคณะขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

1. Areekul, S., Devakul, K., Smitananda, N., Boonyananta, C. and Klongkumnuangarn, K. Prevalence of Anaemia in Thai School Children. *J. Med. Assoc. Thailand*, 1972, **55**, 457.
2. Bjorn-Rasmussen, E. and Hallberg, L. Effect of Animal Proteins on the Absorption of Food Iron in Man. *Nutr. Metab.*, 1979, **23**, 192-202.
3. Bjorn-Rasmussen, E., Hallberg, L., Isaksson, B. and Arvidsson, B. Food Iron Absorption in Man. Application of the Two-pool Extrinsic Tag Method to Measure Heme and Nonheme Iron Absorption from the Whole Diet. *J. Clin. Invest.*, 1974, **53**, 274-355.
4. Bonnet, T.D., Hagedorn, A.B. and Owen, C.A. A Quantitative Method for Measuring the Gastrointestinal Absorption of Iron. *Blood*, 1960, **15**, 36-44.
5. Bothwell, T.H., Charlton, R.W., Cook, J.D. and Finch, C.A. Iron Metabolism in Man. Blackwell, Oxford, 1979.
6. Bothwell, T.H., Pirzio-Biroli, G. and Finch, C.A. Iron Absorption. I. Factors Influencing Absorption. *J. Lab. & Clin. Med.*, 1958, **51**, 24-36.
7. Brise, H. and Hallberg, L. Iron Absorption Studies. *Acta Med. Scand. Suppl.*, 1962, **171**(7), 376.
8. Callender, S.T., Marney, S.R. and Warner, G.T. Eggs and Iron Absorption. *Brit. J. Haemat.*, 1970, **19**, 657-665.
9. Callender, S.T. and Warner, G.T. Iron Absorption from Bread. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1968, **21**, 1170-1174.
10. Conrad, M.E. and Schade, S.G. Ascorbic Acid Chelate in Iron Absorption. A Role for Hydrochloric Acid and Bile. *Gastroenterology*, 1968, **55**, 35.
11. Cook, J.D., Finch, C.A. and Smith, N. Evaluation of the Iron Status of a Population. *Blood*, 1976, **48**, 449-455.
12. Cook, J.D., Layrisse, M., Martinez-Torres, C. et al. Food Iron Absorption Measured by Extrinsic Tag. *J. Clin. Invest.*, 1972, **51**, 805-810.
13. Cook, J.D. and Monsen, E.R. Food Iron Absorption. I. Use of a Semisynthetic Diet to Study Absorption of Nonheme Iron. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1974, **28**, 1289-1295.
14. Cook, J.D. and Monsen, E.R. Food Iron Absorption in Man. II. The Effect of EDTA on Absorption of Dietary Nonheme Iron. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1976, **29**, 614-620.
15. Cook, J.D. and Monsen, E.R. Food Iron Absorption in Human Subjects. III. Comparison of the Effect of Animal Proteins on Nonheme Iron Absorption. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1976, **29**, 859-867.
16. Cook, J.D., Morck, T.A. and Lynch, S.R. The Inhibitory Effect of Soy Products on Nonheme Iron Absorption in Man. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1981, **34**, 2622-2629.
17. Eakins, J.D. and Brown, D.A. An Improved Method for the Simultaneous Determination of Iron-55 and Iron-59 in Blood by Liquid Scintillation Counting. *Intern. J. Appl. Radiation Isotopes*, 1966, **17**, 391-397.
18. Garvey, J.S., Cremer, N.E. and Sussdorf, D.H. Methods in Immunology. A Laboratory Text for Instruction and Research. 3rd ed., Massachusetts Advanced Book Program Reading Inc., Massachusetts, 1977.
19. Hahn, P.F., Jones, E., Lowe, R.C., Meneely, G.R. and Peacock, W. The Relative Absorption and Utilization of Ferrous and Ferric Iron in Anaemia as Determined with the Radioactive Isotope. *Am. J. Physiol.*, 1945, **143**, 191.
20. Halkett, J.A.E., Peters, T. and Ross, J.F. Studies on the Deposition and Nature of Egg Yolk Iron. *J. Biol. Chem.*, 1958, **231**, 187-199.
21. Hallberg, L. and Bjorn-Rasmussen, E. Determination of Iron Absorption from Whole Diet. *Scand. J. Haematol.*, 1972, **9**, 193.
22. Hallberg, L. and Bjorn-Rasmussen, E. Measurement of Iron Absorption from Meals Contaminated with Iron. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1981, **34**, 2808-2815.
23. Hallberg, L., Garby, L., Suwanik, R. and Bjorn-Rasmussen, E. Iron Absorption from South-east Asian Diets. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1974, **27**, 826.
24. Hallberg, L. and Rossander, L. Effect of Soy Protein on Nonheme Iron Absorption in Man. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1982, **36**, 514-520.

25. Hallberg, L. and Rossander, L. Improvement of Iron Nutrition in Developing Countries: Comparison of Adding Meat, Soy Protein, Ascorbic Acid, Citric Acid and Ferrous Sulphate on Iron Absorption from a Simple Latin American-type of Meal. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1984, **39**, 577-583.
26. Jacobs, A. and Greenman, D.A. Availability of Food Iron. *Brit. Med. J.*, 1969, **1**, 673-676.
27. Layrisse, M., Martinez-Torres, C. and Gonzalez, M. Measurement of the Total Daily Dietary Iron Absorption by the Extrinsic Tag Model. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1974, **27**, 152.
28. Lindberg, O. and Ernster, L. Determination of Organic Phosphorus Compounds by Phosphate Analysis. *Methods Biochem. Analy.*, 1956, **3**.
29. Martinez-Torres, C. and Layrisse, M. Effect of Amino Acids on Iron Absorption from a Staple Vegetable Food. *Blood*, 1970, **33**, 669.
30. Miller, D.D., Schricker, B.R., Rasmussen, R.R. and Van Campen, D. An In Vitro Method for Estimation of Iron Availability from Meals. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1981, **34**, 2248-2256.
31. Monsen, E.R. and Cook, J.D. Food Iron Absorption in Human Subjects: V. Effects of the Major Dietary Constituents of a Semisynthetic Meal. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1979, **32**, 804-808.
32. Moore, C.V., Dubach, R., Minnich, V. and Roberts, H.K. Absorption of Ferrous and Ferric Radioactive Iron by Human Subjects and by Dogs. *J. Clin. Invest.*, 1944, **23**, 755.
33. Oberleas, D. The Determination of Phytate and Inositol Phosphate. *Methods Biochem. Analy.*, 1971, **20**.
34. Pattanachak, C., Pleehachinda, R., Pattanachak, S., Pattanapunyasut, K., Charoonpongsak, S., Tuntawiroon, M. and Suwanik, R. Iron Intake of Thais. *J. Med. Assoc. Thailand*, 1981, **64**(1), 49-50.
35. Peters, T., Apt, L. and Ross, J.F. Effect of Phosphates upon Iron Absorption Studied in Normal Human Subjects and in an Experimental Model Using Dialysis. *Gastroenterology*, 1971, **61**, 315-322.
36. Rao, B.S.N. and Prabhavathi, T. An In Vitro Method for Predicting the Bioavailability of Iron From Food. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1978, **31**, 169-175.
37. Sayers, M.H., Lynch, S.R., Jacobs, P., Charlton, R.W., Bothwell, T.H., Walker, R.B. and Mayet, F. The Effects of Ascorbic Acid Supplementation on the Absorption of Iron in Maize, Wheat and Soya. *Brit. J. Haemat.*, 1973, **24**, 209-218.
38. Sayers, M.H., Lynch, S.R., Charlton, R.W., Bothwell, T.H., Walker, R.B. and Mayet, F. The Fortification of Common Salt with Ascorbic Acid and Iron. *Brit. J. Haemat.*, 1974, **28**, 483-495.
39. Sayers, M.H., Lynch, S.R., Charlton, R.W., Bothwell, T.H., Walker, R.B. and Mayet, F. Iron Absorption from Rice Meals Cooked with Fortified Salt Containing Ferrous Sulphate and Ascorbic Acid. *Brit. J. Nutr.*, 1974, **31**, 367-375.
40. Schricker, B.R. and Miller, D.D. Effect of Cooking and Chemical Treatment of Heme and Nonheme Iron in Meat. *J. Food Sci.*, 1983, **48**, 1340-1349.
41. Schricker, B.R., Miller, D.D., Rasmussen, R.R. and Van Campen, D. A Comparison of In Vivo and In Vitro Methods for Determinating Availability of Iron From Meals. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1981, **34**, 2257-2263.
42. Shich, H.H. and Sweet, T.S. Spectrophotometric Determination of Ascorbic Acid. *Anal. Biochem.*, 1979, **96**, 1-5.
43. Smith, M.D. and Pannacciulli, I.M. Absorption of Inorganic Iron from Graded Doses: Its Significance in Relation to Iron Absorption Tests and the "Mucosal Block" Theory. *Brit. J. Haemat.*, 1958, **4**, 428-434.
44. Sturgeon, P. Studies of Iron Requirements in Infants. III. Influence of Supplemental Iron During Normal Pregnancy on Mother and Infant. *Brit. J. Haemat.*, 1959, **5**, 45-55.
45. Vajarasthira, S. and Harinasuta, C. Study in Helminthic Infections in Thailand. I. Incidence Distribution and Epidemiology of Seven Common Intestinal Helminths. *J. Med. Assoc. Thailand*, 1957, **40**, 309.
46. Viteri, F.E. and Torun, B. Anaemia and Physical Work Capacity. *Clin. Haematol.*, 1974, **3**(3).
47. Wasi, P. Prevalence of Anaemia in Thailand. *J. Med. Assoc. Thailand*, 1972, **55**(12), 685-688.
48. Weast, R.C., Melvin, J.A. and Bayer, W.H. Handbook of Chemistry and Physics. 65th ed., CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1984-1985.

ตารางที่ 1. การรับประทานอาหารของอาสาสมัคร

กลุ่มที่	วันที่	มือ	สารกัมมันตรังสี	อาหาร
1	1	ก	เหล็ก 55	อาหาร อาหาร + ปังจี้ 1 อาหาร + ปังจี้ 2 Reference dose
	2	ข	เหล็ก 59	
	14	ค	เหล็ก 55	
	15	ร	เหล็ก 59	
2	1	ก	เหล็ก 55	อาหาร อาหาร + ปังจี้ 3 อาหาร + ปังจี้ 4 Reference dose
	2	ข	เหล็ก 59	
	14	ค	เหล็ก 55	
	15	ร	เหล็ก 59	

ตารางที่ 2. การศึกษาความถูกต้องแม่นยำในการหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ของเฟอร์รัสซัลเฟตระหว่างชุดของการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	FeSO ₄ · 7H ₂ O (มกก. *)	จำนวน	$\bar{X} \pm SD$	% สัมประสิทธิ์ ความผันแปร
กลุ่มควบคุม A	0.5	8	49.83 ± 4.09	8.22
กลุ่มควบคุม B	10.0	8	74.76 ± 1.56	2.09
กลุ่มควบคุม C	60.0	8	85.42 ± 3.51	4.10

* มกก. = ไมโครกรัม

ตารางที่ 3. การศึกษาความถูกต้องแม่นยำในการหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ของเฟอร์รัสซัลเฟต
ภายในชุดของการวิเคราะห์

ตัวอย่าง	FeSO ₄ · 7H ₂ O (มก.)	จำนวน	$\bar{X} \pm SD$	% สัมประสิทธิ์ ความผันแปร
กลุ่มควบคุม A	0.5	8	48.69 \pm 3.07	6.32
กลุ่มควบคุม B	10.0	6	74.29 \pm 2.29	3.09
กลุ่มควบคุม C	60.0	7	88.76 \pm 3.34	3.76

ตารางที่ 4. การหาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้จากสารประกอบเหล็กชนิดต่าง ๆ และการเปรียบเทียบ
ในรูปอัตราส่วนกับเฟอร์รัสซัลเฟต

เหล็ก (มก.)	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (มก.)				Fe cpx. FeSO ₄	FeCl ₃ FeSO ₄	FeNaEDTA FeSO ₄
	FeSO ₄	Fe cpx.	FeCl ₃	FeNaEDTA			
0.01	7.31	6.37	3.11	1.70	0.87	0.43	0.23
0.10	86.12	84.70	17.30	3.16	0.98	0.20	0.04
0.60	116.40	126.60	148.09	24.83	1.09	1.27	0.21
1.00	149.30	152.90	217.36	26.93	1.02	1.46	0.18
10.00	220.00	482.00	1331.68	87.48	2.19	6.05	0.40
20.00	206.90	810.00	1995.97	194.74	3.91	9.65	0.94

ตารางที่ 5. การหาเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ทั้งในรูปร้อยละและปริมาณของสารประกอบเหล็กชนิดต่าง ๆ

เหล็ก	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)				ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (มก.)			
	FeSO ₄	Fe cpx.	FeCl ₃	FeNaEDTA	FeSO ₄	Fe cpx.	FeCl ₃	FeNaEDTA
มก.								
0.5	47.84	47.59	44.18	44.85	0.24	0.24	0.23	0.17
1.0	52.11	55.80	37.96	42.56	0.52	0.55	0.39	0.32
2.0	62.98	54.13	32.44	44.99	1.27	1.08	0.67	0.68
4.0	69.53	50.07	27.89	32.44	2.79	2.00	1.50	0.99
10.0	72.76	63.70	22.44	22.36	7.31	6.37	3.11	1.70
20.0	81.39	70.37	20.23	14.48	16.35	14.07	4.18	2.20
40.0	86.56	87.22	11.75	11.16	34.78	34.89	4.38	3.40
60.0	90.42	88.92	12.15	8.86	54.50	53.35	7.53	4.04
80.0	84.66	85.04	13.51	5.94	68.03	68.03	13.60	3.61
μก.								
0.1	85.73	84.70	16.75	4.16	86.12	84.70	17.30	3.16
0.2	38.42	43.43	22.44	7.89	77.20	86.86	46.36	12.00
0.4	26.85	23.52	24.39	5.54	107.90	94.08	100.78	16.86
0.6	19.32	21.10	23.89	5.44	116.40	126.60	148.09	24.83
1.0	14.86	15.29	21.04	3.54	149.30	152.90	217.36	26.93
2.0	6.93	11.68	20.04	2.61	139.20	233.60	414.07	39.71
4.0	3.92	8.58	14.83	2.54	157.50	343.20	612.83	77.29
6.0	2.19	5.48	14.43	1.56	132.00	328.80	894.47	71.20
8.0	3.22	4.79	12.30	1.54	258.80	383.20	1016.58	93.72
10.0	2.19	4.82	12.89	1.15	220.00	482.00	1331.68	87.48
20.0	1.03	4.05	9.66	1.28	206.90	810.00	1995.97	194.74

ตารางที่ 6. ผลของไวตามินซีต่อปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในรูปของสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ที่มีเหล็กอยู่ 0.5 มก.

เหล็ก : ไวตามินซี (โมล)	ไวตามินซี (มก.)	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)
0.5 : 0	0	16.93
0.5 : 0.5	1.58	17.80
0.5 : 1	3.15	16.62
0.5 : 2	6.31	17.71
0.5 : 4	12.61	18.66
0.5 : 8	25.23	20.78
0.5 : 16	50.46	18.82
0.5 : 32	100.91	16.73

ตารางที่ 7. ผลของไวตามินซีต่อปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในรูปของสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ที่มีเหล็กอยู่ 1 มก.

เหล็ก : ไวตามินซี (โมล)	ไวตามินซี (มก.)	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)
1 : 0	0	12.52
1 : 0.5	1.58	13.43
1 : 1	3.15	13.22
1 : 2	6.31	13.59
1 : 4	12.61	13.61
1 : 8	25.23	13.78
1 : 16	50.46	16.36
1 : 32	100.91	13.54

ตารางที่ 8. ผลของวิตามินซีต่อปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในรูปของสารละลาย

วิตามินซี (มก.)	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)	
	เหล็ก 60 มก.	เหล็ก 400 มก.
0	7.82	2.04
1	41.50	24.69
2	67.29	42.74
4	93.05	46.05

ตารางที่ 9. ผลของไข่ไก่ต่อปริมาณของเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในสารละลายของสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ ที่มีเหล็กอยู่ 0.5 มก.

ตัวอย่าง	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)
FeSO ₄ · 7H ₂ O	19.94
FeSO ₄ · 7H ₂ O + ไข่แดง 1 ก.	1.68
FeSO ₄ · 7H ₂ O + ไข่ขาว 1 ก.	21.19
FeSO ₄ · 7H ₂ O + ไข่ไก่ทั้งฟอง 1 ก.	1.33
FeCl ₃ · 6H ₂ O	28.93
FeCl ₃ · 6H ₂ O + ไข่แดง 1 ก.	0.0
FeCl ₃ · 6H ₂ O + ไข่ขาว 1 ก.	36.20
FeCl ₃ · 6H ₂ O + ไข่ไก่ทั้งฟอง 1 ก.	7.54
FeNaEDTA	7.78
FeNaEDTA + ไข่แดง 1 ก.	7.98
FeNaEDTA + ไข่ขาว 1 ก.	6.95
FeNaEDTA + ไข่ไก่ทั้งฟอง 1 ก.	6.67

ตารางที่ 10. การวิเคราะห์อาหารกลุ่มต่างๆ

ชนิดอาหาร	ปริมาณเหล็ก ทั้งหมด (มก./ก.)	ปริมาณเหล็กที่ จะถูกดูดซึมได้ (%)	ปริมาณเหล็กที่ จะถูกดูดซึมได้ (มก./ก.)	ฟอสเฟต (มก./ก.)	วิตามินซี (มก./ก.)
ประเภทแป้ง					
ข้าวเจ้า	4.56	2.12	0.0967	14.1	—
ข้าวเหนียว	11.88	6.00	0.7128	12.5	—
ประเภทผัก					
คะน้า	8.8	3.44	0.3027	—	185.2
ผักกาดขาว	5.88	5.25	0.3087	—	73.5
กะหล่ำปลี	6.94	13.10	0.9091	—	71.1
ถั้วผักยาว	7.44	7.90	0.5878	—	107.8
พริกขี้หนู	8.4	16.61	1.3952	—	339.8
ประเภทผลไม้					
กล้วยน้ำว้า	6.31	0.74	0.0467	—	45.0
มะละกอ	2.43	65.40	1.5892	—	375.0
ส้มเขียวหวาน	1.36	67.14	0.9131	—	160.0
สับปะรด	8.20	65.15	5.3423	—	135.0
ประเภทโปรตีนพืช					
ถั้วเหลือง	27.75	4.47	1.2404	241.7	—
เต้าหู้ขาว	14.88	2.03	0.3021	75.0	—
เต้าหู้ไข่ไก่	8.13	0.74	0.0602	84.4	—
ถั้วเขียว	17.31	5.53	0.9572	76.6	—
นมไวตามินค	2.94	14.48	0.4257	38.5	—
ประเภทโปรตีนสัตว์					
ไก่	4.39	67.12	2.9466	—	—
วัว	22.11	79.87	17.6593	—	—
หมู	14.82	71.89	10.6541	—	—
ปลาทู	13.38	62.39	8.3478	—	—
ปลาช่อน	14.96	73.27	10.9612	—	—
คัมหมู	300.4	69.67	209.2887	—	—
ไข่ไก่ (ทั้งฟอง)	35.66	5.83	2.0790	—	—
— ไข่แดง	76.45	5.79	4.4265	—	—
— ไข่ขาว	5.20	45.48	2.3650	—	—

ตารางที่ 11. ส่วนประกอบและน้ำหนักของอาหารที่ใช้ทำการทดลอง

อาหาร	รายการ	ก./งาน						รวม
		ข้าว	ผัก- กาดขาว	ปลา- ทูทอด	น้ำส้ม- กั้น	ถั่ว- เขียว	เนื้อหมู	
1	อาหาร	280	125	—	—	—	—	405
2	อาหาร + เนื้อปลา	280	125	50	—	—	—	455
3	อาหาร + ไวตามินซี	280	125	—	320	—	—	725
4	อาหาร + ผัก	280	125	—	—	76	—	481
5	อาหาร + เนื้อหมู	280	125	—	—	—	74	479

- อาหาร 1, 2 และ 5 มีโปรตีน 10 ก. (ค่าจากตารางส่วนประกอบอาหาร)
- อาหารทุกชนิดปรับให้มีปริมาณเหล็ก 3 มก. โดยเติม $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ 12. คุณค่าและส่วนประกอบทางโภชนาการของอาหารที่ใช้ทำการทดลอง

อาหาร	น้ำหนัก (ก.)	แคลอรี* (ก.)	ไขมัน* (ก.)	คาโบไฮ- เดรต* (ก.)	โปรตีน* (ก.)	แคล- เซียม* (มก.)	ฟอสฟอ- รัส* (มก.)	ปริมาณเหล็ก (มก.)			
								เดิม*	เพิ่ม	รวม	วิ- เคราะห์**
1	405	474.8	3.446	98.96	9.29	161.3	143.46	2.00	1.0	3.00	3.04
2	455	590.5	12.450	99.12	19.48	163.4	351.12	2.54	0.5	3.04	3.53
3	725	615.8	4.086	130.64	11.21	260.5	201.06	2.43	0.6	3.03	3.17
4	481	755.8	3.846	160.26	19.29	212.6	282.46	2.70	0.3	3.00	3.67
5	479	743.3	28.452	99.12	19.48	169.1	251.12	3.04	—	3.04	2.91

* ค่าคำนวณจากตารางแสดงคุณค่าอาหารไทยในส่วนที่กินได้ 100 กรัม กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2521

** วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 13. การวิเคราะห์อาหารที่ใช้ทำการทดลอง

อาหาร	รายการ	น้ำหนัก (ก.)	เหล็ก (มก.)	ปริมาณเหล็กที่จะ ถูกดูดซึมได้ (%)	อัตราส่วนของ เหล็กที่จะถูกดูดซึมได้
1	อาหาร	405	3.04	24.49	1
2	อาหาร + เนื้อปลา	455	3.53	49.28	2.01
3	อาหาร + วิตามินซี	725	3.17	88.65	3.62
4	อาหาร + ผัก	481	3.67	23.10	0.94
5	อาหาร + เนื้อหมู	479	2.91	74.53	3.04

ตารางที่ 14. สถานภาพทางเหล็กของอาสาสมัคร

อาสาสมัคร เพศชาย	อายุ (ปี)	ส่วนสูง (ซม.)	น้ำหนัก (กก.)	% เม็ดเลือด แดงอัดแน่น	ฮีโมโกล- บิน (ก.%)	จำนวน เลือดรวม (มล.)	ปริมาณโปรโตพอร์ฟิน ในเม็ดเลือดแดง (มก./100 มล.)
กลุ่มที่ 1							
1	29	169.5	57.0	37.0	13.8	4404.1	49.5
2	28	161.5	60.0	40.0	16.3	4642.6	67.2
3	37	167.5	57.0	39.3	14.8	4404.1	86.8
4	23	164.5	58.5	36.0	12.7	4523.0	69.6
5	23	153.5	51.0	37.5	14.3	3928.1	59.9
6	24	163.0	52.5	35.0	12.7	4047.0	65.9
7	29	171.0	69.0	39.0	14.2	5360.0	54.2
8	37	169.0	65.0	36.0	12.7	5040.8	86.1
9	37	173.0	64.0	41.1	14.4	4961.1	45.3
10	28	153.5	43.0	35.0	12.7	3296.1	65.9
11	28	162.5	61.0	39.5	12.2	4722.1	55.7
Mean	29.4	164.4	58.0	37.8	13.7	4484.5	64.2
± SEM	± 1.56	± 1.97	± 2.19	± 0.64	± 0.37	± 173.53	± 4.04

ตารางที่ 14. (ต่อ)

อาสาสมัคร เพศชาย	อายุ (ปี)	ส่วนสูง (ซม.)	น้ำหนัก (กก.)	%เม็ดเลือดค- แดงอัดแน่น	ฮีโมโกล- บิน (ก.%)	จำนวน เลือดรวม (มล.)	ปริมาณโปรโตพอฟีริน ในเม็ดเลือดแดง (มคก./100 มล.)
กลุ่มที่ 2							
1	19	172.0	55.0	36.0	13.3	4245.3	64.5
2	29	163.0	47.0	42.0	15.1	3611.7	70.0
3	32	165.0	66.0	39.0	13.5	5120.6	71.1
4	32	158.0	64.0	40.5	15.6	4961.1	53.4
5	31	167.0	52.5	40.5	14.8	4047.0	62.9
6	24	168.0	58.0	34.5	12.8	4483.5	51.1
7	34	163.5	70.0	38.0	14.0	5439.9	56.9
8	25	162.5	58.0	40.0	14.0	4483.5	118.3
9	26	163.5	57.5	42.0	14.8	4443.8	65.8
10	32	162.5	50.0	38.0	12.8	3849.0	72.8
11	31	172.5	55.0	39.0	13.9	4245.3	57.6
12	51	164.5	50.0	37.5	12.0	3849.0	52.6
Mean ± SEM	31.3 ± 2.18	165.1 ± 1.2	56.9 ± 1.99	38.9 ± 0.66	13.9 ± 0.31	4398.3 ± 158.89	66.4 ± 5.18
Total Mean ± SEM	30.0 ± 6.62	164.8 ± 1.11	57.4 ± 1.45	38.4 ± 0.47	13.8 ± 0.24	4439.5 ± 114.96	65.35 ± 3.26

ตารางที่ 15. ผลของปลาทูทอดและวิตามินซี ต่อการดูดซึมเหล็กจากอาหารพื้นฐานในรูปของร้อยละ และอัตราส่วน

อาสาสมัคร กลุ่มที่ 1	การดูดซึมเหล็ก (%)				อาหาร 2	อาหาร 3
	อาหาร 1	อาหาร 2	อาหาร 3	Reference dose	อาหาร 1	อาหาร 1
1	33.11	37.05	81.30	82.75	1.12	2.46
2	51.15	69.40	70.34	77.53	1.36	1.38
3	1.91	1.91	5.21	6.97	1.00	2.73
4	2.99	2.65	9.55	23.35	0.89	3.19
5	1.58	1.51	2.83	9.54	0.96	1.79
6	1.24	0.73	4.95	16.38	0.59	3.99
7	11.79	7.66	52.69	65.42	0.65	4.47
8	8.13	7.61	49.88	59.77	0.94	6.14
9	4.09	6.37	9.20	14.08	1.56	2.25
Mean	12.89	14.99	31.77	38.87	1.01	3.16
± SEM	± 5.84	± 7.76	± 10.52	± 10.61	± 0.10	± 0.50

ตารางที่ 16. ร้อยละของการดูดซึมเหล็กจากอาหารพื้นฐาน ผลจากปลาทูทอดและวิตามินซี เมื่อคิดที่ ร้อยละ 40 ของสารละลายเหล็กมาตรฐาน

อาสาสมัคร กลุ่มที่ 1	การดูดซึมเหล็ก (%)		
	อาหาร 1	อาหาร 2	อาหาร 3
1	16.00	17.91	39.30
2	26.39	35.81	36.29
3	10.96	10.96	29.90
4	5.12	4.54	16.36
5	6.62	6.33	11.87
6	4.78	2.81	19.08
7	7.21	4.68	32.22
8	5.44	5.09	33.38
9	11.62	18.10	26.14
Mean ± SEM	10.46 ± 2.35	11.64 ± 3.53	23.85 ± 3.99

ตารางที่ 17. ผลของถั่วเขียวและเนื้อหมูต่อการดูดซึมเหล็กจากอาหารพื้นฐานในรูปของร้อยละและอัตราส่วน

อาสาสมัคร กลุ่มที่ 2	การดูดซึมเหล็ก (%)				อาหาร 4	อาหาร 5
	อาหาร 1	อาหาร 4	อาหาร 5	Reference dose	อาหาร 1	อาหาร 1
1	3.77	1.13	36.41	24.11	0.30	9.66
2	4.95	1.66	8.00	27.05	0.34	1.62
3	33.28	18.55	35.62	61.60	0.56	1.07
4	8.33	1.57	7.01	19.22	0.19	0.84
5	1.74	0.60	18.74	20.77	0.35	10.77
6	3.05	1.86	9.19	17.38	0.61	3.01
7	7.02	6.83	14.84	16.03	0.97	2.11
8	28.19	22.96	70.30	100.00	0.81	2.49
9	3.29	2.30	3.50	8.99	0.70	1.06
10	2.21	1.51	5.62	10.83	0.68	2.54
11	5.87	2.39	32.95	38.65	0.41	5.61
12	4.75	1.52	24.60	37.90	0.32	5.18
Mean ± SEM	8.87 ± 3.02	5.24 ± 2.16	22.23 ± 5.78	31.88 ± 7.49	0.52 ± 0.07	3.89 ± 0.96

ตารางที่ 18. ร้อยละของการดูดซึมเหล็กจากอาหารพื้นฐาน ผลจากถั่วเขียวและเนื้อหมู เมื่อคิดเป็น ร้อยละ 40 ของสารละลายเหล็กมาตรฐาน

อาสาสมัคร กลุ่มที่ 2	การดูดซึมเหล็ก (%)		
	อาหาร 1	อาหาร 4	อาหาร 5
1	6.25	1.87	60.41
2	7.32	2.45	11.83
3	21.61	12.05	23.13
4	17.34	3.27	14.59
5	3.35	1.16	36.09
6	7.02	4.28	21.15
7	17.52	17.04	37.03
8	11.28	9.18	28.12
9	14.64	10.23	15.57
10	8.16	5.58	20.76
11	6.08	2.47	34.10
12	5.01	1.60	25.96
Mean	10.47	5.93	27.40
± SEM	± 1.71	± 1.46	± 3.85

ตารางที่ 19. การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลองของอาหารที่ใช้ทดลอง
ในอาสาสมัคร

ลำดับที่	ปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)				
	อาหาร 1	อาหาร 2	อาหาร 3	อาหาร 4	อาหาร 5
1	16.85	39.72	84.21	24.70	76.36
2	15.82	47.82	88.18	22.28	68.27
3	35.22	50.87	81.80	29.91	66.14
4	24.40	49.04	97.90	24.57	75.13
5	33.58	52.48	95.79	22.24	77.70
6	29.28	49.26	92.33	24.19	83.60
7	24.11	53.55	87.68	18.30	—
8	34.68	47.04	88.69	19.96	—
9	24.11	52.05	80.65	24.92	—
10	26.19	47.40	89.25	20.93	—
11	28.40	46.67	—	21.12	—
12	20.70	51.23	—	—	—
13	20.75	54.20	—	—	—
14	20.77	—	—	—	—
15	19.29	—	—	—	—
16	22.48	—	—	—	—
17	21.92	—	—	—	—
18	22.14	—	—	—	—
Mean	24.49	49.28	88.65	23.10	74.53
± SEM	± 1.36	± 1.07	± 1.77	± 0.90	± 2.62
n	18	13	10	11	6

ตารางที่ 20. การเปรียบเทียบผลการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร และปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง ในรูปของอัตราส่วน

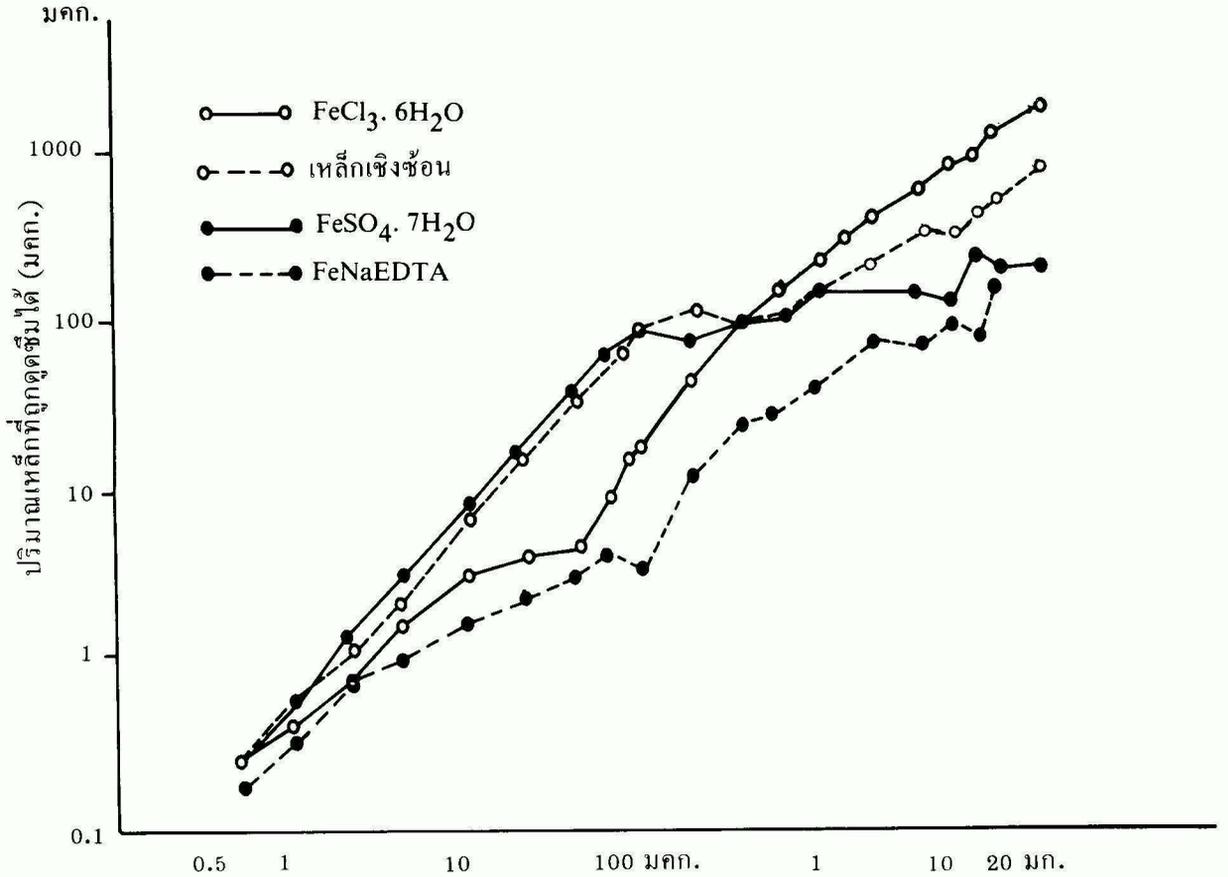
อาหาร	รายการ	อัตราส่วน การดูดซึมเหล็ก	อัตราส่วน เหล็กที่จะถูกดูดซึมได้
1	อาหาร	1.00	1.00
2	อาหาร + เนื้อปลา	1.11	2.01
3	อาหาร + วิตามินซี	2.28	3.62
4	อาหาร + ผัก	0.57	0.94
5	อาหาร + เนื้อหมู	2.63	3.04

- ทุกค่าแทนอัตราส่วนน้ำหนักเลขคณิต
- สหสัมพันธ์ของอัตราส่วนการดูดซึมเหล็กและอัตราส่วนเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ $r = 0.9192$

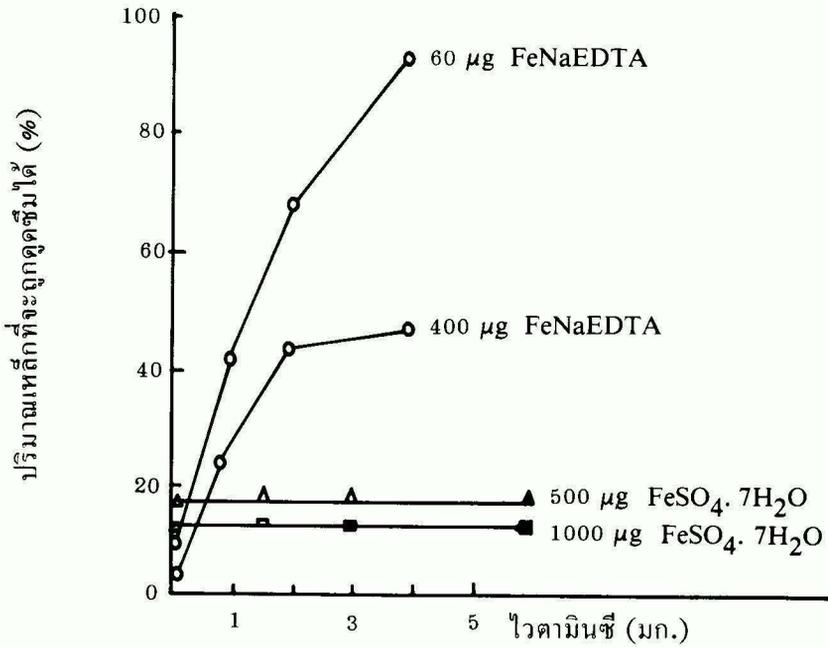
ตารางที่ 21. การเปรียบเทียบผลการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร และปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง ในรูปของร้อยละ

อาหาร	การดูดซึมเหล็ก (%)		เหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%)	
	$\bar{X} \pm \text{SEM}$	n	$\bar{X} \pm \text{SEM}$	n
1	10.46 ± 1.36	21	24.49 ± 1.36	18
2	11.64 ± 3.53	9	49.28 ± 1.07	13
3	23.85 ± 3.99	9	88.65 ± 1.77	10
4	5.93 ± 1.46	12	23.10 ± 0.90	11
5	27.40 ± 3.85	12	74.53 ± 2.62	6

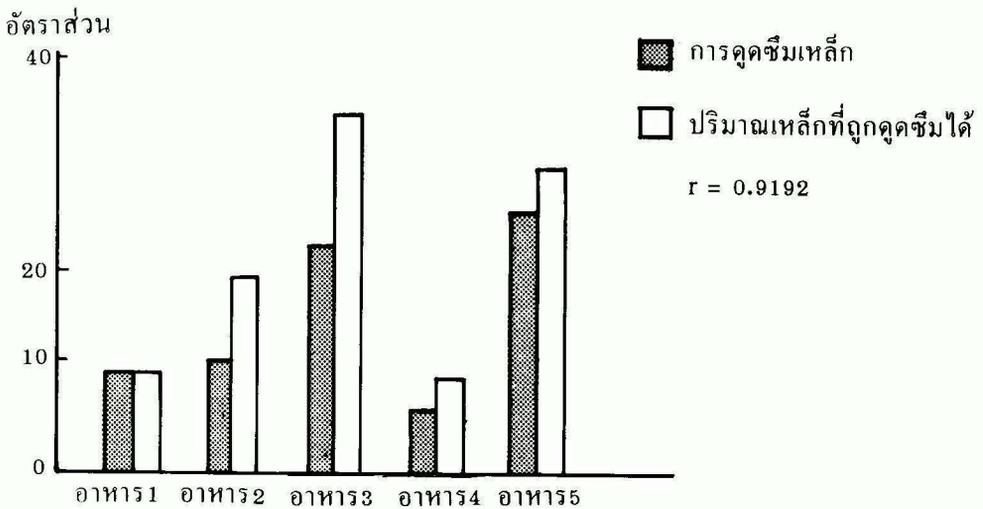
- สหสัมพันธ์ของการดูดซึมเหล็ก (%) และเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ (%) $r = 0.9197$



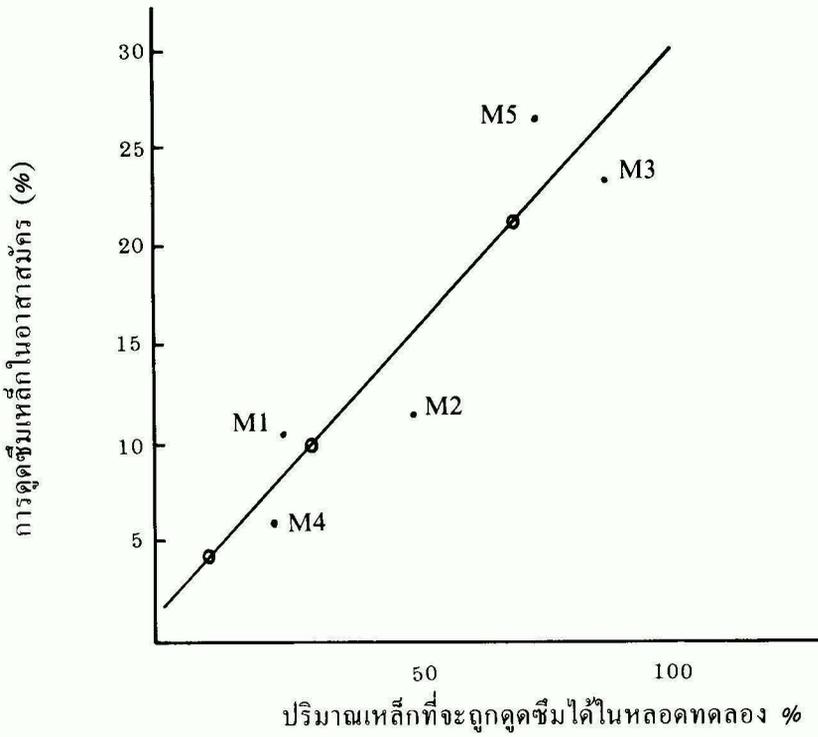
รูปที่ 1. การเปรียบเทียบปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซึมได้ และปริมาณเหล็กที่มีอยู่ทั้งหมดของสารประกอบเหล็กชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2. ผลของวิตามินซีต่อปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ ในสารละลาย FeNaEDTA และเฟอร์รัสซัลเฟต



รูปที่ 3. การเปรียบเทียบในรูปอัตราส่วนของผลการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร และปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง



รูปที่ 4. การเปรียบเทียบในรูปร้อยละของผลการดูดซึมเหล็กในอาสาสมัคร และปริมาณเหล็กที่จะถูกดูดซึมได้ในหลอดทดลอง