บทนำ

1. อะฟลาทอกซิน

สารพิษอะฟลาทอกซินนี้สร้างขึ้นจากเส้นใยของเชื้อราในสกุล *Aspergillus* ได้แก่ *Aspergillus flavus*, *Aspergillus parasiticus* และ *Aspergillus nomius* ที่มักพบในอาหารและผลิตผลทางการเกษตรที่มีความชื้น และมีกระบวนการผลิตและการเก็บรักษาที่ไม่ดีพอ อาทิเช่น ฝ้าย ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง เครื่องเทศน์ และถั่วชนิดต่างๆ โดยสารพิษอะฟลาทอกซินนี้จัดเป็นสารเคมีอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลหรือการเมแทบอลิซึมชนิดทุติยภูมิของเชื้อรา (secondary metabolism) (อนงค์, 2546; Coppock *et al.*, 2012) ซึ่งสารพิษอะฟลาทอกซิน เป็นสารพิษสำคัญที่สุดที่พบในอาหารมนุษย์และอาหารสัตว์ (Diener *et al.*, 1987; Williams *et al.*, 2004; Strosnider *et al.*, 2006) สารพิษนี้ส่งผลเสียต่อสุขภาพทั้งในมนุษย์ สัตว์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เนื่องจากสารพิษอะฟลาทอกซินมีความเป็นพิษต่อตับ (hepatotoxins) ลดภูมิต้านทาน (immunosuppressants) ทำให้เกิดการก่อกลายพันธุ์ (mutagens) เป็นสารที่ก่อให้เกิดลูกวิรูป คือ ก่อให้เกิดความผิดปกติต่อทารกที่เกิดจากบิดาหรือมารดาที่ได้รับสารพิษอะฟลาทอกซินเข้าสู่ร่างกาย เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogens) และมีความเชื่อมโยงกับความผิดปกติของการเจริญเติบโต ซึ่งทำให้เกิดลักษณะแคระแกรน รวมทั้งมีผลทำให้เกิดการหย่อนสมรรถภาพทางการสืบพันธุ์ได้ (Robens and Richard, 1992; Eaton and Gallagher, 1994; Bennett and Klich, 2003; Shuaib *et al.*, 2010)

สารพิษอะฟลาทอกซินมีผลกระทบต่อสุขภาพทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง มีประชากรประมาณ 4.5 ล้านคนที่ได้รับสารพิษนี้แบบเรื้อรังจากการที่ไม่สามารถควบคุมการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินได้ (Williams *et al.*, 2004) และยังพบว่าประชากรมีความเสี่ยงที่จะได้รับสารพิษอะฟลาทอกซินแบบเรื้อรังมากกว่า 5 ล้านคน (Khlangwiset and Wu, 2010) เนื่องจากมีการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินทั้งในวัตถุดิบทางการเกษตรและอาหารที่ผ่านการแปรรูปแล้ว ดังนั้นในแต่ละประเทศทั่วโลกจึงได้กำหนดปริมาณการปนเปื้อนที่ยอมรับได้สูงสุดของสารพิษอะฟลาทอกซินในอาหาร และอาหารสัตว์ ซึ่งประเทศไทยได้กำหนดให้ปริมาณการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินที่ยอมรับได้สูงสุด คือ 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

สารพิษอะฟลาทอกซินที่พบส่วนใหญ่มี 4 ชนิด คือ อะฟลาทอกซิน บี1 (Aflatoxin B_1, AFB_1) อะฟลาทอกซิน บี2 (Aflatoxin B_2, AFB_2) อะฟลาทอกซิน จี1(Aflatoxin G_1, AFG_1) และอะฟลาทอกซิน จี2 (Aflatoxin G_2, AFG_2) อะฟลาทอกซินเหล่านี้เป็นสารเคมีอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากการเมแทบอลิซึมชนิดทุติยภูมิของเชื้อรา อะฟลาทอกซินเป็นสารพวก บิส-ฟิวราโน-ไอโซคู

มาริน (bis-furano-isocumarin) เชื่อมกับวงแหวนไซโคลเพนตีโนน ได้เป็นอะฟลาทอกซินชนิด B หรือเชื่อมกับวงแหวนแลคโตน ได้เป็นอะฟลาทอกซินชนิด G ในการสังเคราะห์สารพิษอะฟลาทอกซินของเชื้อรานั้น เริ่มจากมีสารตั้งต้น คือ เกลือแอซีเตต และเกลือมาโลเนต ถูกกระตุ้นด้วยโคเอนไซม์เอ (CoA) ได้เป็นแอซีติลโคเอ (acetyl-CoA) และมาโลนิลโคเอ (malonyl-CoA) ต่อมาสารทั้งสองจะรวมตัวกันได้เป็นสารชนิดใหม่ของไดคีไดด์ (diketides) หรือแอโทแอซีติลโคเอ และปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยารวมตัวทุกครั้ง หมู่แอซีติลจะถูกเติมลงในสารตัวกลางคีไดด์เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนได้เป็นเดคะคีไดด์ (decaketides) และจะมีปฏิกิริยาผ่านตัวกลางอีกหลายชนิด ซึ่งสารตัวกลางเหล่านี้จะถูกดีคาร์บอกซีเลต (decarboxylate) ถูกออกซิไดส์และด้วยปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ จะเกิดเป็นวงแหวนกลายเป็นสารพิษอะฟลาทอกซินได้ (Bhatnagar *et al.*, 1991) จากนั้นเมื่ออะฟลาทอกซินเหล่านี้ผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมภายหลังจากที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายคน หรือสัตว์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลไปจากเดิม เรียกสารพิษโครงสร้างโมเลกุลใหม่นี้ว่า อะฟลาทอกซินเมแทบอไลท์ (Aflatoxin metabolites) หรือ อะฟลาทอกซิน M มี 2 ชนิด คือ อะฟลาทอกซิน M_1 และ M_2 โดยอะฟลาทอกซิน M_1 เป็นอะฟลาทอกซินเมแทบอไลท์ของอะฟลาทอกซิน B_1 ส่วนอะฟลาทอกซิน M_2 คือสารไฮดรอกซีเลท (Hydroxylated) ของอะฟลาทอกซิน B_2 ซึ่งคุณสมบัติการเรืองแสงอาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและทำให้ความเป็นพิษลดลงได้ เช่น อะฟลาทอกซิน M_1 มีความเป็นพิษน้อยกว่า อะฟลาทอกซิน B_1 โดยพบว่าอะฟลาทอกซิน M_1 และ M_2 มักปนเปื้อนมากับน้ำนมทั้งในน้ำนมคน และน้ำนมวัว (Garrido *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2009; Coppock *et al.*, 2012)

2. ความเป็นพิษของอะฟลาทอกซิน

สารพิษอะฟลาทอกซินมีความเป็นพิษได้ทั้งแบบเฉียบพลัน และแบบเรื้อรัง โดยอาการเกิดพิษแบบเฉียบพลัน (acute aflatoxicosis) มักเกิดในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ อาการที่เกิดจากการได้รับสารพิษอะฟลทอกซินในเด็กมักมีอาการคล้ายคลึงกับโรค Reye's syndrome คือ มีอาการชักและหมดสติได้ เนื่องจากมีความผิดปกติของตับและสมอง น้ำตาลในเลือดลดต่ำลง สมองบวม เกิดการสะสมไขมันที่ตับ ไต หัวใจ และปอด โดยที่ในผู้ใหญ่จะพบอาการตับวายเฉียบพลัน มีการตกเลือดภายใน เนื้อตายที่ตับ มีอาการบวมน้ำ หายใจลำบาก หมดสติ เมื่อได้รับอะฟลาทอกซินปริมาณมาก และเสียชีวิตในที่สุดหากไม่ได้รับการรักษาอย่างทันท่วงที ดังในรายงานของ Wild and Gong (2010) กล่าวว่าถ้ามนุษย์ได้รับสารพิษอะฟลาทอกซินมากกว่า 20 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักร่างกายต่อวัน จะมีผลรุนแรงต่อมนุษย์ และตายได้ภายใน 7 - 21 วัน ส่วนการเกิดพิษแบบเรื้อรัง (chronic aflatoxicosis) เป็นอาการที่เกิดความผิดปกติที่เซลล์ตับ โดยเซลล์ตับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นเซลล์มะเร็งที่ตับได้ อีกทั้งยังทำให้ระบบภูมิคุ้มกันของ

ร่างกายลดต่ำลง โปรตีนในเลือดลดต่ำลง เกิดอาการเจ็บป่วยง่าย (Li *et al.*, 2001) ปัจจัยที่มีผลต่อระดับการเกิดพิษคือ อายุ เพศ ฮอร์โมน การทำงานของเอนไซม์ต่างๆในตับ การบริโภคอาหาร และปริมาณสารพิษที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย อะฟลาทอกซินเป็นสารก่อมะเร็งจากธรรมชาติที่รุนแรงที่สุด จะเห็นได้จากการที่องค์กร International Agency for Research on Cancer (IARC) ได้จัดให้สารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 เป็นสารก่อมะเร็ง (Carcinogenic potential) ในมนุษย์กลุ่มที่ 1 (Group 1: Carcinogenic to humans) โดยเฉพาะโรคมะเร็งตับชนิด Hepatocellular carcinoma (HCC) ซึ่งเป็นโรคมะเร็งที่พบมากเป็นอันดับ 8 ของโลก โรคมะเร็งตับชนิด HCC นี้มีสาเหตุมาจากอะฟลาทอกซิน B_1 กับเชื้อไวรัส hepatitis B virus (HBV) ที่ไปมีผลทำให้เกิดความผิดปกติที่เซลล์ตับ (Basappa, 2009)

ในประเทศไทยพบอุบัติการณ์ที่เกิดจากสารพิษอะฟลาทอกซิน โดยพบการเกิดอาการของโรค Reye's syndrome ในเด็กอายุระหว่าง 1-7 ปี ซึ่งมีอาการคลื่นไส้ ชักกระตุกหมดสติ และตายภายในระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง มีสาเหตุเนื่องจากบริโภคข้าวเหนียวนึ่งค้างคืนที่มีการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซิน ในปี พ.ศ. 2514 ที่จังหวัดอุดรธานี ผลการตรวจพบว่าผู้เสียชีวิตสมองบวม ตับถูกทำลาย ตับมีขนาดโตผิดปกติ ต่อมน้ำเหลืองบวม บริเวณไตและกล้ามเนื้อหัวใจผิดปกติ และมีไขมันสะสมในตับ (ทิพยา และคณะ, 2530; สุรีลักษณ์, 2538)

มีรายงานว่าในประเทศเคนยา ปี ค.ศ.1981 เกิดโรคอะฟลาทอกซิโคซิส (aflatoxicosis) ระบาดอย่างรุนแรง เนื่องจากการบริโภคข้าวโพดที่มีการปนเปื้อนของสารพิษอะลาทอกซิน และยังพบว่าโรคมะเร็งเป็นสาเหตุอันดับสองของการเสียชีวิตของประชาชนในประเทศบราซิล โดย 4% ของประชาชนชาวบราซิลที่เสียชีวิตด้วยโรคมะเร็ง เป็นการเสียชีวิตจากโรคมะเร็งตับชนิด HCC (Basappa, 2009)

3. การลดปริมาณการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซิน

วิธีลดการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินในพืชผลทางการเกษตรและอาหารสามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีนั้นจำเป็นต้องเป็นวิธีการที่ดี คือเป็นวิธีที่ไม่ผิดข้อกำหนดที่กฎหมายได้กำหนดไว้ สามารถลดระดับการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยและยอมรับได้ และควรมีต้นทุนในการดำเนินงานที่เหมาะสมด้วย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ ดังนี้

3.1 วิธีทางกายภาพ

การลดการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในอาหารด้วยวิธีทางกายภาพ ประกอบด้วยการคัดเลือกวัตถุดิบ การใช้ความร้อน มีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การคัดเลือกวัตถุดิบ

การคัดเลือกวัตถุดิบที่เสื่อมสภาพ แตกหักหรือมีเชื้อราออก เพื่อเป็นการลดการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของเชื้อราและสารพิษอะฟลาทอกซินในวัตถุดิบกลุ่มเดียวกัน ดังเช่น มีการคัดแยกเมล็ดถั่วลิสงดิบที่มีตำหนิออก ลักษณะถั่วลิสงที่มีตำหนิได้แก่ ถั่วลิสงที่มีเมล็ดเหี่ยว เมล็ดมีตำหนิเนื่องจากแมลงหรือเครื่องจักร เมล็ดมีเยื่อหุ้มเมล็ดไม่สมบูรณ์ สีเยื่อหุ้มเมล็ดผิดปกติ มีการงอกของเมล็ดและเชื้อราให้เห็น การคัดแยกถั่วลิสงด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะช่วยให้ลดปริมาณการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในถั่วลิสงได้ (สุดาทิพย์, 2550)

3.1.2 การใช้ความร้อน

อะฟลาทอกซินจะมีความเสถียรในการให้ความร้อนแบบแห้ง มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 260 °C ความไวของอะฟลาทอกซินต่อความร้อนจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น องค์ประกอบของอาหารชนิดนั้นๆ ระดับของอุณหภูมิ ระยะเวลาการให้ความร้อน และลักษณะการให้ความร้อน มีรายงานว่าต้องให้ความร้อนน้ำมันพืช (มะพร้าว ถั่วลิสง น้ำมันมะกอก) ถึงอุณหภูมิ 200°C เพื่อลดปริมาณอะฟลาทอกซิน (Basappa, 2009) และการอบพีแคน (peacans) ที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้ 80% (Escher *et al.*, 1973)

ความร้อนชื้นจะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดอะฟลาทอกซินได้ดีขึ้น เนื่องจากวงแหวนแลคโตนของโครงสร้างอะฟลาทอกซินถูกทำลายที่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่า 260°C ทำให้ความเป็นพิษของอะฟลาทอกซินลดลง โดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ใช้ในการแปรรูปอาหารนั้นจะอยู่ระหว่าง 80-200°C ซึ่งพบว่าสามารถลดอะฟลาทอกซินได้ 60% (สภาวะในห้องปฏิบัติการ) และมีบางรายงานที่กล่าวว่าการปรุงอาหารจากถั่วลิสง (ความชื้น 30%) ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถลดอะฟลาทอกซินได้ 66% และเพียงลวกข้าวโพดก็สามารถลดอะฟลาทอกซินได้ 28% (Basappa, 2009)

ปัญญาภรณ์ (2555) รายงานว่า การต้มถั่วลิสงที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 60 นาที สามารถลดอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 77% ในขณะที่การคั่วถั่วลิสงที่อุณหภูมิ 170 และ 200°C เป็นเวลา 50 และ 15 นาที สามารถลดอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 36 และ 55% ตามลำดับ อีกทั้งการทอด และบดผัดพริกแห้งด้วยน้ำมันที่อุณหภูมิ 150 และ 150°C เป็นเวลา 3 และ 15 นาที ตามลำดับ สามารถลดอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 53-67%

3.1.3 วิธีทางกายภาพอื่นๆ เช่น การฉายรังสีชนิด Gamma-rays สามารถลดการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินได้แต่วิธีการที่ใช้มีต้นทุนสูงและผู้บริโภคยังไม่ยอมรับวิธีฉายรังสีดังกล่าว และลดการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินด้วยแสงแดด หรือการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต

3.2 วิธีทางเคมี

การลดการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินด้วยวิธีทางเคมีนี้สามารถแบ่งประเภทของสารเคมีที่ช่วยลดปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารเคมีประเภทกรด ด่าง และสารออกซิไดซ์ ซึ่งสารเคมีแต่ละประเภทจะมีการออกฤทธิ์ที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติของสารเคมีประเภทนั้นๆ ดังนี้

3.2.1 กรด

สารเคมีประเภทกรดจะมีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของอะฟลาทอกซิน B_1 และ G_1 เปลี่ยนไปกลายเป็นอะฟลาทอกซิน B_{2a} และ G_{2a} ในสภาวะที่มีน้ำ เนื่องจากโมเลกุลของน้ำไปจับกับพันธะคู่ที่วงแหวนฟูแรน ซึ่งกรดจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Jalili *et al.*, 2011) ซึ่งอะฟลาทอกซิน B_{2a} และ G_{2a} มีความรุนแรงน้อยกว่าอะฟลาทอกซิน B_1และ G_1

มีรายงานว่าการใช้กรดซิตริก (citric acid) และ กรดแลคติก (lactic acid) ร่วมกับการแปรรูปแบบเอ็กซ์ทรูชันในข้าวฟ่าง สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้ 92% และ 67% ตามลำดับ (Mendez-Albores *et al.*, 2009) และยังพบอีกว่าเมื่อแช่พริกไทยขาวด้วยกรดซิตริก และกรดแอซีติก (acetic acid) ที่ความเข้มข้น 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 28% และ 23% ตามลำดับ (Jalili *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กรดซิตริกที่ความเข้มข้น 1% ล้างพริกแห้งในขั้นตอนการเตรียมพริกแกงจะช่วยลดการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินในพริกแกงได้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการล้างด้วยน้ำเท่านั้น (Anupanpong *et al.*, 2010) และ King and Prudente (2005) รายงานว่าสารเคมีประเภทกรดประกอบด้วย anthranilic, benzoic, boric และ oxalic ที่ความเข้มข้น 5 นอร์มอล สามารถลด

ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 (ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ในข้าวฟ่างได้มากกว่า 90% ถึงแม้ว่าสารเคมีประเภทกรดแก่จะสามารถลดปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ แต่กรดจะมีผลน้อยหรือไม่มีผลเลยต่อการลดปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน B_2 G_2 และ B_{2a}

3.2.2 ด่าง

สารเคมีประเภทด่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) และแอมโมเนีย (ammonia) สารประเภทนี้จะช่วยลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้โดยด่างจะไปจับกับวงแหวนแลคโตน ทำให้วงแหวนแลคโตนเปิดออกเกิดเป็นโครงสร้างโมเลกุลใหม่ เรียกว่า beta-keto acid ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี ดังนั้นจึงล้างหรือกำจัดอะฟลาทอกซินออกได้โดยง่าย แต่โครงสร้างโมเลกุลดังกล่าวจะสามารถกลับสู่โครงสร้างเดิมได้เมื่ออยู่ในสภาวะกรด ทำให้อะฟลาทอกซินมีความเป็นพิษดังเดิมได้ มีการทดลองนำพริกไทยขาวมาแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนีย และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด พบว่าสามารถลดปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซินได้ 33.8%, 46.8% และ 47.0% ตามลำดับ (Jalili *et al.*, 2011) Basappa (2009) รายงานว่าในกระบวนการผลิตขนมข้าวโพดอบกรอบ สามารถลดสารพิษอะฟลาทอกซินที่ปนเปื้อนในข้าวโพดที่ความเข้มข้น 1,600 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัมได้ 99% ซึ่งกระบวนการผลิตขนมข้าวโพดอบกรอบนั้นประกอบไปด้วย การลวกข้าวโพดใน โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ แล้วอบที่อุณหภูมิ 121°C และนำไปทอดที่อุณหภูมิ 196°C เป็นเวลา 15 นาที เป็นขั้นตอนสุดท้าย

3.2.3 สารออกซิไดซ์

สารออกซิไดซ์สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้โดยที่สารออกซิไดซ์ไปจับกับพันธะคู่ที่วงแหวนฟูแรน ทำให้โครงสร้างของอะฟลาทอกซินเปลี่ยนไปความเป็นพิษของอะฟลาทอกซินจึงลดลง ดังเช่นการลดสารพิษอะฟลาทอกซินในถั่วลิสง โดยการต้มถั่วลิสงในน้ำเดือดที่มีสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 10% ต้มเป็นเวลา 60 นาทีในสภาวะกรด (Conzane *et al.*, 2002) มีการทดลองใช้แก๊สโอโซนในการลดสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1ในพริกป่น โดยInan *et al.* (2007) รายงานว่าการใช้แก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 33 และ 66 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้สัมผัสกับพริกป่นเป็นเวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 80 และ 93% ตามลำดับ โดยไม่มีผลต่อสีและคุณภาพของพริก ณัฐพงษ์ และคณะ (2553) รายงานว่าการใช้แก๊สโอโซนที่ความเข้มข้น 120 มิลลิกรัมต่อลิตร รมพริกขี้หนูแห้งเป็นเวลา 60 นาที สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์และสารพิษอะฟลาทอกซินจากปริมาณอะฟลา

ทอกซินเริ่มต้นเท่ากับ 5.4 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม หลังผ่านการรมด้วยแก๊สโอโซนปริมาณอะฟลาทอกซินลดลงเหลือเพียง 3.6 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และ Jalili *et al.* 2011 รายงานว่าเมื่อแช่พริกไทยขาวในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) และ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ (sodium hydrosulfite) ความเข้มข้น 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด สามารถลดปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน ได้ 34.8-44.3% และ 25.0-36.8% ตามลำดับ

3.3 วิธีทางชีวภาพ

การลดและควบคุมเชื้อราและสารพิษอะฟลาทอกซินด้วยวิธีทางชีวภาพนั้น ทำได้โดยการใช้จุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ รา แอคติโนมัยซีส และอื่นๆ มาทำการทดสอบความสามารถในการควบคุมหรือกำจัดเชื้อราและสารพิษอะฟลาทอกซิน หรือเปลี่ยนรูปแบบโครงสร้างของอะฟลาทอกซินให้มีความเป็นพิษลดลงดังเช่นการใช้ *Rhodococcuserythropolis* ซึ่งสร้างเอนไซม์ที่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้ โดยไม่พบสารก่อกลายพันธุ์เมื่อตรวจวัดด้วยวิธี Ames test (Alberts *et al.*, 2006) และยังพบว่า *Bacillus subtilis strain UTBSP1* สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในถั่วพิสตาชิโอ (pistachio nut) ได้ 95% ในสภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 35-40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดย *B. subtilis strain UTBSP1* จะไปทำให้โครงสร้างของ อะฟลาทอกซิน B_1 เปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงสร้างใหม่ที่ไม่มีความเป็นพิษ (Farzaneh *et al.*, 2012)

4. การปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในพริกแห้ง

พริกแห้ง (dried red chili) คือพริกที่ผ่านการตากแห้งหรืออบแห้งแล้ว มีความชื้นต่ำมาก มีสีแดง ปัญหาที่มักพบในพริกแห้งคือ มักมีการเจริญของเชื้อราในพริกแห้ง แล้วเกิดการสร้างสารพิษจากเชื้อรา เช่น อะฟลาทอกซิน B_1 เนื่องจากความชื้นระหว่างการเก็บรักษาและจากการทำแห้งไม่เพียงพอ จึงทำให้เกิดเชื้อราแล้วสร้างสารพิษอะฟลาทอกซินขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา รวมถึงการสร้างสารพิษอะฟลาทอกซินในระหว่างกระบวนการเพาะปลูกที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนมากับพริกด้วย ดังนั้นเมื่อนำพริกแห้งมาแปรรูปเพื่อเป็นอาหารสำหรับบริโภค จึงทำให้เกิดการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินในอาหารเหล่านั้นได้ โดยเฉพาะในพริกแห้งที่มีขนาดผลใหญ่ เนื้อหนา ทำให้ควบคุมความชื้นได้ยาก อาทิเช่น พริกพันธุ์บางช้าง จึงมักพบปัญหาการเกิดเชื้อรามากในพริกชนิดนี้ และพบว่า 8.3% ของตัวอย่างพริกแห้งมีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินอยู่ในช่วงระดับความเข้มข้น 23-75 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม (Muansrijun *et al.*, 2009) และจากการสำรวจการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในพริกแห้งแบบเมล็ดเต็ม และแบบป่นละเอียด พบว่ามีการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซิน 12.26-61.28 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในพริกแห้งเมล็ดเต็ม และ

7.84-14.40 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในพริกป่นละเอียด (ดวงจันทร์ และวนิดา, 2545) และจากการสำรวจวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบของพริกแกงเผ็ดแดงในเขตจังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งประกอบด้วย พริกแห้ง กระเทียม และพริกไทย มีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน 100 50 และ 100% ตามลำดับ (กิตติรัตน์, 2551) ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามที่จะหาวิธีการต่างๆเพื่อป้องกันการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินในพริกแห้ง อาทิเช่น การอบแห้ง การเด็ดก้าน และการเก็บรักษาไว้ในที่แห้ง เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ก็ไม่สามารถป้องกันและกำจัดอะฟลาทอกซินได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การศึกษาวิธีการที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดหรือกำจัดอะฟลาทอกซินในระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากพริกแห้งจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะช่วยลดความเสี่ยงในการได้รับสารพิษอะฟลาทอกซินของผู้บริโภค อันตรายจากสารพิษอะฟลาทอกซินที่มีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจในด้านการเสื่อมเสียของผลิตผลทางการเกษตรและด้านการกีดกันทางการค้าด้วย

พริกแกงแดง (red curry paste) เป็นเครื่องแกงชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรุงอาหารของคนไทย เช่น แกงเผ็ด ผัดเผ็ด เป็นต้น พริกแกงแดงมีส่วนผสม ประกอบด้วย พริกแห้ง กระเทียม หอมแดง ตะไคร้ ข่า และเครื่องเทศอื่นๆ สารอะฟลาทอกซิน จัดเป็นสารก่อมะเร็งที่สำคัญ จากการศึกษาด้านระบาดวิทยาพบว่าการบริโภคอาหารที่มีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเกิดโรคมะเร็งตับ จากรายงานการตรวจปริมาณการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในพริกแกงแดงในประเทศไทย พบว่าตัวอย่างพริกแกงแดงร้อยละ 40-60 มีการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซิน ถึงแม้ว่าในมาตรฐานอุตสาหกรรมไทยและมาตรฐานสินค้าชุมชนจะมีการกำหนดปริมาณสูงสุดของอะฟลาทอกซินให้ได้ไม่เกิน 20 ppb แต่เนื่องจากอะฟลาทอกซินเป็นสารก่อมะเร็งที่มีความสามารถก่อกลายพันธุ์ร่วมด้วย ดังนั้นจึงแนะนำให้ควรลดปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกแกงแดงให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ตามหลักการของ ALARA (AS Low As Reasonably Achievable) ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้บริโภค โดยทั่วไปการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซินในพริกแกงแดงเกิดจากการที่วัตถุดิบหลักคือพริกแห้งมีปริมาณอะฟลาทอกซินที่สูง ดังนั้นการหาวิธีในการลดปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกแห้งซึ่งเป็นวัตถุดิบเพื่อนำมาผลิตพริกแกงแดงเป็นสิ่งจำเป็นยิ่ง ทั้งนี้เพื่อหาแนวทางให้ผู้ผลิตพริกแกงแดง และเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคต่อไป

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อหาสารเคมีร่วมกับการให้ความร้อนที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกแห้งเพื่อนำไปใช้ในการผลิตพริกแกงแดง
2. ประเมินผลกระทบของการใช้สารเคมีร่วมกับการให้ความร้อนต่อคุณภาพทางเคมีและกายภาพของน้ำพริกแกงแดง
3. เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตพริกแดงที่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้มากที่สุดโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของพริกแกงแดง

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแห้ง

นำพริกแห้ง (ไม่มีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1) มาตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 ตารางเซนติเมตร แช่ในน้ำสะอาดนาน 30 นาที ผึ่งให้แห้ง จากนั้นสร้างการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินเทียมโดยเติมสารมาตรฐานอะฟลาทอกซิน B_1 ให้พริกแห้งมีอะฟลาทอกซิน B_1 ปนเปื้อน 50±10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม โดยหยดสารละลายมาตรฐานอะฟลาทอกซิน B_1 ความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ลงบนพริก แล้วผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

2. ผลของการใช้สารเคมีต่อคุณภาพและการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1ในพริกแกงแดง

นำพริกแห้งที่ปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1 แช่ในสารละลายสารเคมีที่มีความเข้มข้น 0.5% และ 2% สารเคมีที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยสารเคมีประเภทกรด (กรดซิตริก, กรดแอซีติก) ด่าง (โซเดียมไบคาร์บอเนต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์) และสารออกซิไดส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์, โซเดียมไฮโพคลอไรต์) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตัวอย่างควบคุมคือ พริกที่แช่ในน้ำกลั่นแทนสารเคมี หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดจนมีค่า พีเอช 6.5-7.5 จากนั้นนำพริกแต่ละตัวอย่างมาบดให้ละเอียดเพื่อเตรียมพริกแกงแดง แล้ววิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 และคุณภาพทางเคมีกายภาพ ดังนี้

2.1 คุณภาพทางกายภาพ

2.1.1 สี วัดด้วยเครื่องวัดสี Hunter colorimeter (Miniscan XE Plus 45/0 LAV, Reston, USA) ใช้มาตรฐานระบบ CIE Lab (L*a*b*)

2.1.2 ค่าสีแดง ทำการสกัดค่าสีแดงดัดแปลงจากวิธีของ AOAC International (2002) โดยนำตัวอย่างพริกแดงบด 1± 0.001 กรัม มาสกัดด้วย acetone สั่นสะเทือนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง นาน 30 นาที จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงแล้วเจือจางสารสกัดที่ได้ด้วย acetone วัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้ spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 460 นาโนเมตร แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยวิธี American Spices and Trade Association (ASTA)

2.2 คุณภาพทางเคมี

2.2.1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม ทำการตรวจสอบหาปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมได้โดยใช้วิธี Folin- Ciocalteu Colorimetric Method ตามวิธีของ Inchuen *et al.* (2010) โดยดัดแปลงเล็กน้อยด้วยการนำสารสกัดพริกปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร เติม Folin-Ciocalteu reagent ความเข้มข้นร้อยละ 10 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ 4 นาที และเติม sodium carbonate ความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันในหลอดทดลอง ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25°C จากนั้นวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร ด้วย UV-visible spectrophotometer ซึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมวัดจากปริมาณ gallic acid (มิลลิกรัม) equivalent ต่อ กรัมวัตถุดิบแห้ง

2.2.2 ปริมาณแคปไซซิน วิเคราะห์หาปริมาณแคปไซซิน ดัดแปลงจากวิธีของ Choi และคณะ (2006) โดยนำตัวอย่างพริกแกงแดงบด 8 กรัม ผสมกับเมทานอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วนำมาปั่นผสมนาน 2 นาที สั่นสะเทือนด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง เวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาหมุนเหวี่ยงด้วย ที่อุณหภูมิ 25°C นำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman ขนาด 0.45 µm จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มาวิเคราะห์หาปริมาณแคปไซซินด้วยเครื่อง HPLC ที่ใช้ UV detector

2.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1

2.3.1 การตรวจวิเคราะห์สารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ด้วยวิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ดัดแปลงจากวิธีของ Rahmani และคณะ (2010) โดยการนำ

ตัวอย่างพริกแกงแดงที่บดละเอียด ปริมาณ 25±0.1 กรัม ปั่นผสมกับโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 5 กรัม และสารละลายเมทานอลต่อน้ำ (อัตราส่วน 80 ต่อ 20, ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman จากนั้นปิเปตสารละลายปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman GF/C (glass fiber filter) จากนั้นกรองผ่านคอลัมน์ immuno-affinity columns (IAC) ผ่านสารละลายเมทานอลต่อน้ำ (อัตราส่วน 20 ต่อ 80 ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วอะฟลาทอกซินจะถูกชะด้วยเมทานอล HPLC grade ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำสารละลายปริมาตร 20 ไมโครลิตร ฉีดเข้าไปในเครื่อง HPLC โดยใช้คอลัมน์ C18 ในการตรวจวิเคราะห์

2.3.2 การตรวจวิเคราะห์สารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ด้วยวิธี Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) เริ่มด้วยทำการสกัดตัวอย่างพริก โดยนำพริกที่บดละเอียดปริมาณ 20±0.1 กรัม ปั่นผสมกับสารละลายเมทานอลต่อน้ำ (อัตราส่วน 70 ต่อ 30 ปริมาตรต่อปริมาตร) ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำสารละลายดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยชุดทดสอบ ELISA โดยการผสมสารละลาย ปริมาตร 100 ไมโครลิตร กับ conjugate ปริมาตร 200 ไมโครลิตร ปิเปตสารละลายผสม 100 ไมโครลิตร มาใส่ในหลุมทดสอบ antibody coated microwell บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 15 นาที เทสารทิ้งแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง คว่ำหลุมทดสอบบนกระดาษซับแล้วเคาะให้แห้ง เติม substrate ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ลงในหลุมทดสอบ บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 5 นาที เติม stop solution ปริมาตร 100 ไมโครลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา และอ่านค่าความเข้มข้นของสีด้วย Microplate reader ที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ควรอ่านผลการทดสอบภายใน 60 นาที หลังการเติมสารละลายหยุดปฏิกิริยา ในการหยุดปฏิกิริยา

3. ผลของการใช้สารเคมีร่วมกับความร้อนต่อการลดอะฟลาทอกซิน B_1 และคุณภาพของพริกแกงแดง

นำพริกแห้งที่ปนเปื้อน อะฟลาทอกซิน B_1 แช่ในสารละลายสารเคมีชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด (ตามผลการทดลองในข้อ 2) จากนั้นให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิระดับต่างกัน 2 ระดับ คือ 90 และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำร้อน (อุณหภูมิ 100°C) เป็นเวลา 10 และ 20 นาที โดยมีตัวอย่างควบคุมคือ พริกแห้งที่แช่ในสารละลาย 0.5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ไม่ให้ความร้อน และพริกแห้งที่แช่ในน้ำกลั่นและไม่ได้ให้ความร้อน จากนั้นนำพริกมาบดให้ละเอียด แล้ววิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) และคุณภาพทางเคมีกายภาพเช่นเดียวกับการทดลองข้อ 2

4. การทดสอบทางประสาทสัมผัส

4.1 การเตรียมน้ำแกงแดง

นำพริกแห้งแกะเอาเมล็ดออกแช่ในสารเคมีชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด (ตามผลการทดลองในข้อ 2) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด และนำไปให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิและวิธีการที่เหมาะสมที่สุด (ตามผลการทดลองในข้อ 3) ลดอุณหภูมิทันทีด้วยน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 1-4°C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเตรียมพริกแกงแดงโดยนำพริกที่ได้มาบดผสมกับส่วนผสมต่างๆของพริกแกงแดง แล้วนำไปเตรียมเป็นน้ำแกงแดง ตัวอย่างควบคุมคือน้ำแกงแดงที่ปรุงจากพริกแกงที่เตรียมโดยการนำพริกแห้งที่ไปแช่ในน้ำสะอาด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน

4.2 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ทดสอบทางประสาทสัมผัสน้ำแกงแดงโดยใช้วิธีทดสอบความแตกต่างแบบ Triangle test เป็นการทดสอบความแตกต่างระหว่างตัวอย่างน้ำแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำสะอาด และไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม กับตัวอย่างน้ำแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารเคมีร่วมกับการให้ความร้อน โดยนำเสนอตัวอย่างน้ำแกงแดงให้ผู้ทดสอบ 3 ตัวอย่างพร้อมกัน ซึ่งตัวอย่าง 3 ตัวอย่างดังกล่าวประกอบด้วย ตัวอย่างที่ผลิตจากสูตรเดียวกัน 2 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่ผลิตจากสูตรแตกต่างอีก 1 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างจะถูกให้รหัสตัวเลขสุ่มสามหลักที่แตกต่างกัน ทดสอบแต่ละคนจะต้องบ่งชี้ว่าตัวอย่างใดมีความแตกต่าง โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน

ผลการวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการใช้สารเคมีร่วมกับการให้ความร้อนต่อคุณภาพและการลดปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกแห้งซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของพริกแกงแดง ในการศึกษานี้จึงใช้พริกแห้งเป็นวัตถุดิบในการผลิตพริกแกงแดงเพียงอย่างเดียว เพื่อให้สามารถสรุปผลได้ถูกต้องและชัดเจน

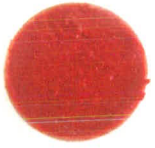
1. ผลของการใช้สารเคมีต่อคุณภาพและการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดง

การศึกษาผลของสารเคมีต่อคุณภาพและการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1ในพริกแกงแดงนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของสารเคมีต่อคุณภาพของพริกแกงแดงซึ่งประกอบด้วย ลักษณะปรากฏ ค่าสี (L*a*b*) ค่าสีแดง (ASTA) ปริมาณแคปไซซิน และปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ผลของสารเคมีต่อลักษณะปรากฏของพริกแกงแดง

ลักษณะปรากฏที่พิจารณา คือ สีและกลิ่นของพริกแกงแดงภายหลังจากผ่านการแช่ด้วยสารเคมีประเภทกรด (กรดซิตริก, กรดแอซีติก) ด่าง (โซเดียมไบคาร์บอเนต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์) และสารออกซิไดส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์, โซเดียมไฮโพคลอไรต์) ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% ผลการทดลองในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของพริกแกงแดงที่ผ่านการแช่ในสารเคมีต่างๆที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากการพิจารณาสีของพริกแกงแดงด้วยสายตา พบว่าพริกแกงแดงที่ผ่านการเตรียมจากพริกแห้งที่แช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% และโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2% มีผลทำให้มีสีเข้มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) ในทางกลับกันพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% จะมีสีซีดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) อย่างไรก็ตามการพิจารณาสีของพริกที่ผ่านการแช่ในสารเคมีต่างๆ ด้วยสายตาเพียงอย่างเดียวทำให้เห็นผลไม่ชัดเจนนัก ผู้วิจัยจึงได้ทำการวัดค่าสีด้วยระบบสีของ CIE color system เพื่อให้ทราบผลที่ชัดเจนมากขึ้นซึ่งผลการทดลองแสดงในหัวข้อ 1.2 และเมื่อทดลองสูดดมกลิ่นสารเคมีที่อาจตกค้างในพริก พบว่าพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 2% มีกลิ่นของสารเคมีตกค้างอยู่ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์

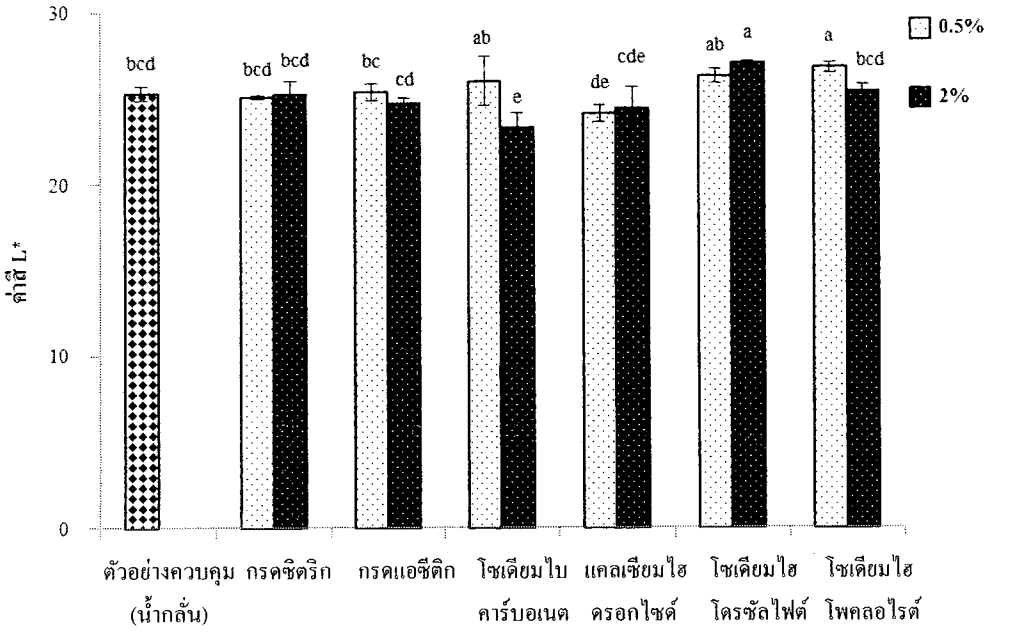
ตารางที่ 1 พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งผ่านการแช่ในสารเคมีต่าง ๆที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ความเข้มข้น	ชื่อสารเคมี					
	กรดซิตริก	กรดแอซีติก	โซเดียมไบคาร์บอเนต	แคลเซียมไฮดรอกไซด์	โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์	โซเดียมไฮโพคลอไรต์
0.5%						
2%						

หมายเหตุ ตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น)

1.2 ผลของสารเคมีต่อค่าสี (L*a*b*) ในพริกแกงแดง

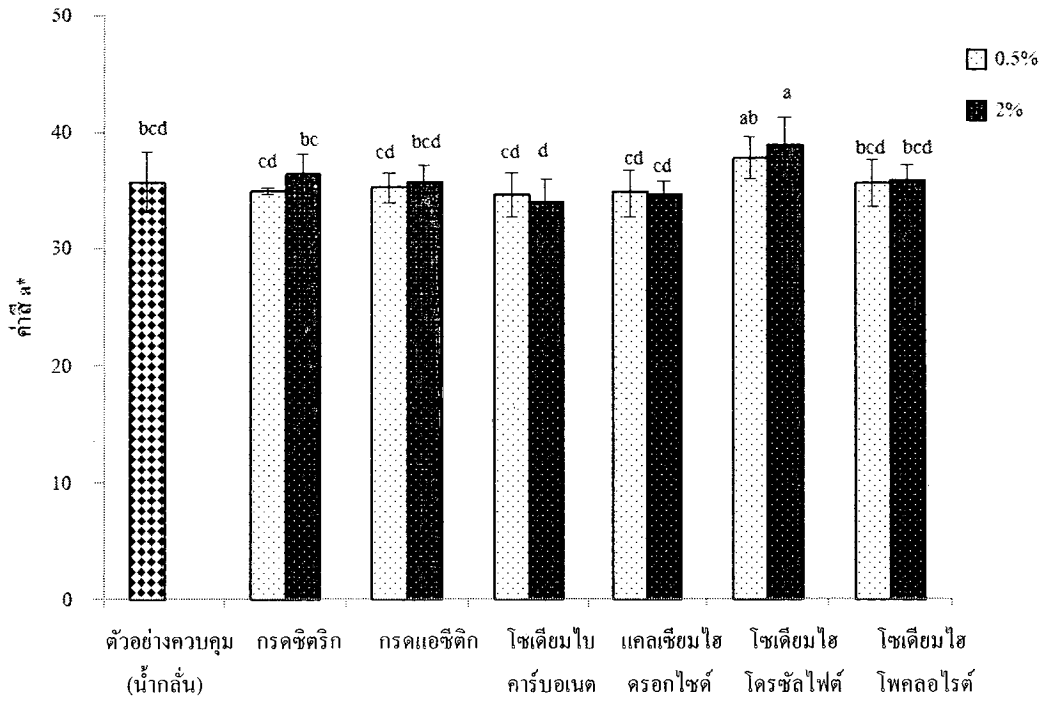
จากการทดลองแช่พริกแห้งในสารเคมีประเภทกรด (กรดซิตริก, กรดแอซีติก) ด่าง (โซเดียมไบคาร์บอเนต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์) และสารออกซิไดส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์, โซเดียมไฮโพคลอไรต์) ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2 แล้วนำมาบดละเอียดเพื่อเตรียมเป็นพริกแกงแดง พบว่าสารเคมีดังกล่าวมีผลต่อค่าสี L* (ค่าความสว่าง) a* (ค่าสีแดง) และ b* (ค่าสีเหลือง) ของพริกแกงแดง โดยพบว่าพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2% ค่า L* หรือค่าความสว่างของพริก (L* เท่ากับ 23.5) ลดลงจากตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) (L* เท่ากับ 25.3) ($p \leq 0.05$) ในทางกลับกันพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% มีค่า L* (L* เท่ากับ 26.8 และ 27.0 ตามลำดับ) เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) ($p \leq 0.05$) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ค่าสี L* ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

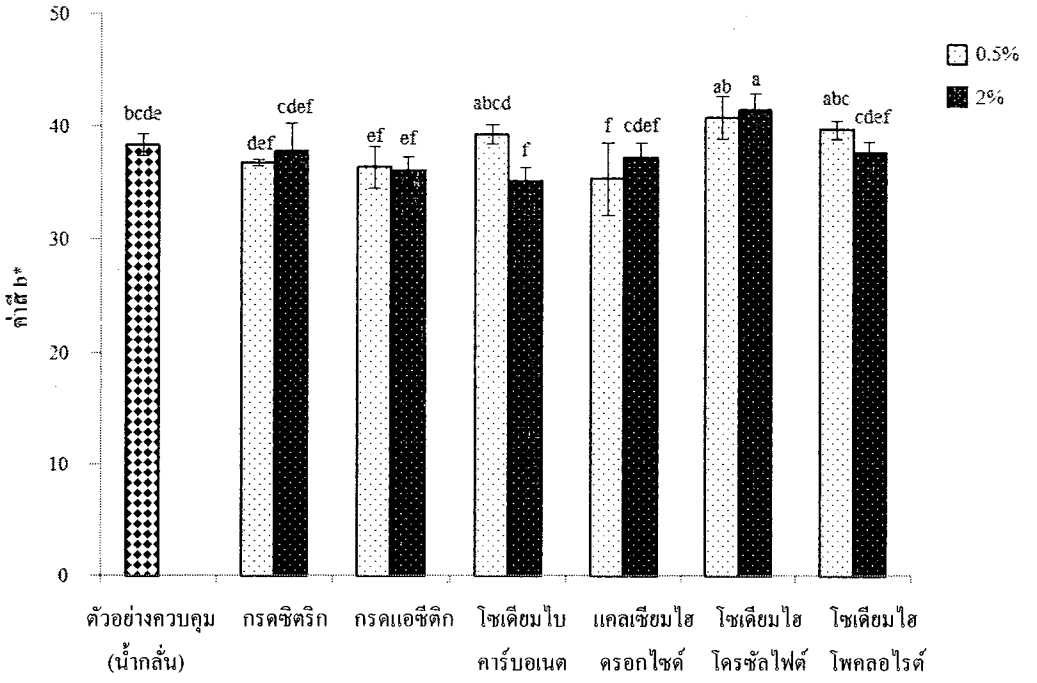
ตัวอักษร a-e ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการวัดค่า a* หรือค่าสีแดง พบว่าสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% (a* เท่ากับ 38.7) มีผลทำให้พริกแกงแดงมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) ($p \leq 0.05$) โดยที่ตัวอย่างควบคุมวัดค่า a* ได้เท่ากับ 35.7 (ภาพที่ 2) ในขณะที่สารเคมีอื่นๆไม่ทำให้ค่าสีแดงของพริกแห้งเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 2 ค่าสี a* ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ตัวอักษร a-d ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ผลการวัดค่า b* หรือค่าสีเหลือง พบว่าพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% (b* เท่ากับ 35.4) และโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2% (b* เท่ากับ 35.1) มีผลทำให้พริกแกงแดงมีค่า b* ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) ($p \leq 0.05$) โดยตัวอย่างควบคุมวัดค่า b* ได้เท่ากับ 38.4 (ภาพที่ 3) และยังพบพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% (b* เท่ากับ 41.5) มีค่า b* เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$)

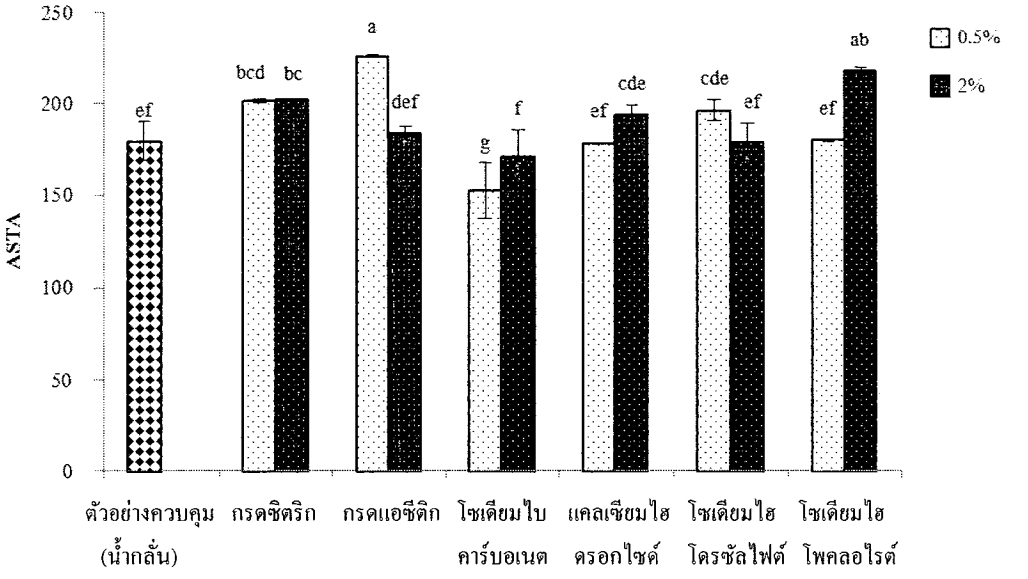


ภาพที่ 3 ค่าสี b* ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ตัวอักษร a-f ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสารละลายโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% มีผลทำให้ค่า a* ของพริกแกงแดงเพิ่มขึ้น และโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% มีผลทำให้ค่า L* a* และ b* ของพริกแกงแดงเพิ่มขึ้น เนื่องจากโซเดียมไฮโพคลอไรต์ และโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มีสมบัติเป็นสารฟอกขาว ทำให้สีของพริกมีความสว่างมากขึ้น พริกจึงมีสีแดงที่ชัดเจนขึ้น โดยโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์จะมีความรุนแรงมากกว่าโซเดียมไฮโพคลอไรต์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Jalili *et al.* (2011) ที่ทำการศึกษาการลดปริมาณอะฟลาทอกซินในพริกไทยขาวและพริกไทยดำโดยการแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ และพบว่าสารละลายเหล่านี้มีผลทำให้ผิวนอกของพริกไทยขาวขาวสว่างขึ้น ในขณะที่ทำให้ผิวด้านนอกของพริกไทยดำมีสีซีดลง ส่วนการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2% มีผลทำให้ค่าความสว่างของพริกไทยลดลง

1.3 ผลของสารเคมีต่อค่าความเข้มสีแดง (ASTA)

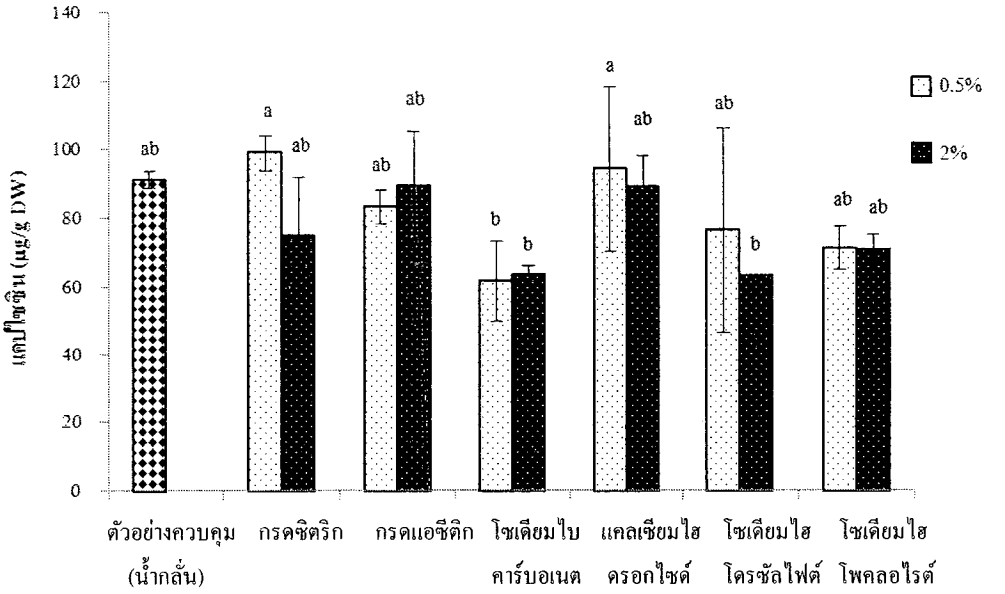
การวัดค่าสีแดงในพริกแห้งด้วยวิธี ASTA เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้วัดค่าสีในพริกเพื่อบ่งบอกถึงระดับคุณภาพของพริกแห้งหรือแบ่งเกรด การวัดค่าสีแดงในพริกแห้งด้วยวิธี ASTA สามารถทำได้โดยนำพริกที่ผ่านการบดแล้วมาสกัดด้วยอะซีโตน แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 460 นาโนเมตร จากการวัดค่าสีแดงในพริกที่ผ่านการแช่ในสารเคมีประเภท กรด (กรดซิตริก, กรดแอซีติก) ด่าง (โซเดียมไบคาร์บอเนต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์) และสารออกซิไดส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์, โซเดียมไฮโพคลอไรต์) ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% พบว่า พริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2% (ASTA เท่ากับ 201.0 และ 202.0 ตามลำดับ) สารละลายกรดแอซีติกที่ความเข้มข้น 0.5% (ASTA เท่ากับ 225.4) และสารละลายโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 2% (ASTA เท่ากับ 217.1) มีค่าความเข้มสีแดงเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) ที่วัดค่า ASTA ได้เท่ากับ 179.5 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่กรดซิตริกและกรดแอซีติกมีค่าพีเอชที่ต่ำ ทำให้ไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (เป็นเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล) ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ดังกล่าวอยู่ในช่วงพีเอช 5-7 (นิธิยา, 2549; นาริสา และคณะ, 2552) ในขณะที่โซเดียมไฮโพคลอไรต์เป็นสารออกซิไดส์อาจทำให้สีของพริกมีความสว่างและพริกมีสีแดงที่ชัดเจนขึ้น ในทางกลับกันภายหลังจากแช่พริกแห้งด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5% (ASTA เท่ากับ 152.6) พบว่ามีค่าความเข้มสีแดงลดลงจากตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 ค่าความเข้มสีแดง (ASTA) ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพ คลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ตัวอักษร a-g ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

1.4 ผลของสารเคมีต่อปริมาณแคปไซซินในพริกแห้ง

แคปไซซินเป็นสารสำคัญอีกชนิดหนึ่งในพริก เนื่องจากแคปไซซินเป็นสารที่ให้รสชาติเผ็ดร้อนในพริกซึ่งเป็นลักษณะเด่นของพริก ในการวิเคราะห์ปริมาณแคปไซซินในพริกนั้นจะทำโดยการสกัดพริกที่ผ่านการบดแล้วด้วยเมทานอล จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณแคปไซซินด้วยเทคนิค HPLC ซึ่งจากการทดลองวิเคราะห์หาปริมาณแคปไซซินในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารเคมีที่เป็นกรด (กรดซิตริก, กรดแอซีติก) ด่าง (โซเดียมไบคาร์บอเนต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์) และสารออกซิไดส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์, โซเดียมไฮโพคลอไรต์) ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% พบว่า ปริมาณแคปไซซินในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งผ่านการแช่สารเคมีข้างต้นไม่มีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p>0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 5

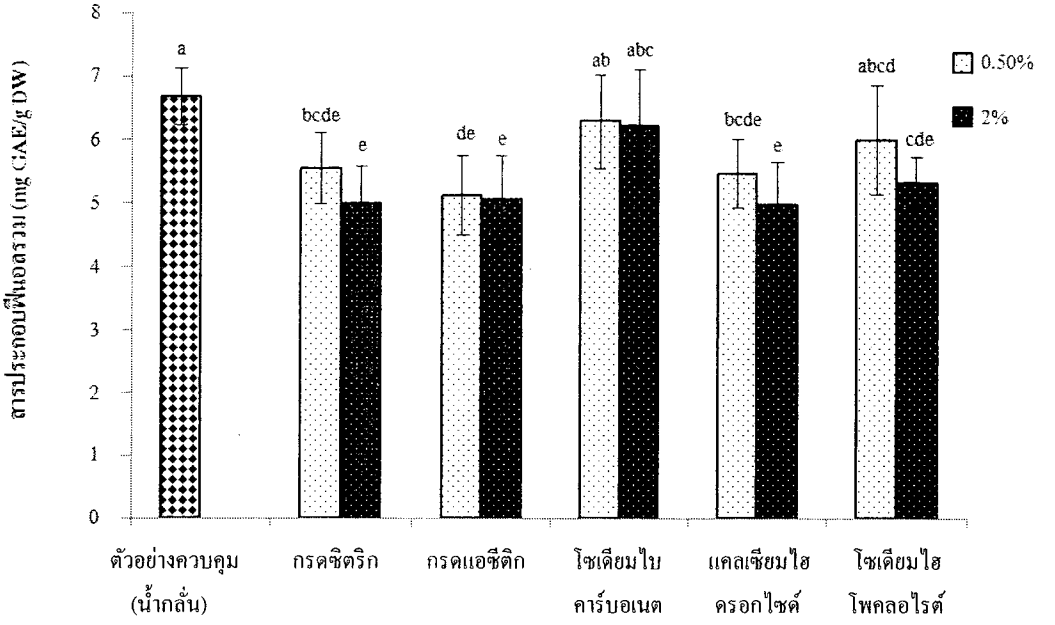


ภาพที่ 5 ปริมาณแคปไซซินในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ตัวอักษร a-b ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

1.5 ผลของสารเคมีต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม

สารประกอบฟีนอลรวม (total phenolic compound) เป็นสารที่สามารถต้านอนุมูลอิสระได้ พบได้ตามธรรมชาติในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ สมุนไพร ธัญพืช เครื่องเทศ รวมทั้งในพริกด้วย สารประกอบฟีนอลรวมในพริก เช่น อะพิจินิน (apigenin) และลูทอีโอลิน (luteolin) เป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีคุณสมบัติสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมโดยการนำพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารเคมีชนิดและความเข้มข้นต่างๆ มาบดละเอียดเพื่อเตรียมพริกแกงแดงแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลความเข้มข้น 80% จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric Method จากการทดลองดังกล่าวพบว่าการแช่พริกแห้งในสารละลายกรดซิตริก กรดแอซีติก และแคลซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% รวมทั้งโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 2% มีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในพริกแกงแดงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากเนื้อเยื่อและเซลล์ของพริกแห้งถูกทำลายด้วยสารเคมีดังกล่าวทำให้มีลักษณะเปื่อยยุ่ย ดังนั้นสารประกอบฟีนอลในเนื้อเยื่อพริกจึงมีโอกาสสัมผัสกับน้ำและละลายน้ำออกมาซึ่งได้มากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Milbury *et al.* (2006) ที่รายงานว่าการลวกอัลมอนด์

ด้วยน้ำร้อน เป็นเวลา 2 นาที ทำให้ผิวเปลือกนอกของเมล็ดอัลมอนด์หลุดออก เมื่อวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลในเนื้ออัลมอนด์ และในน้ำที่ใช้ลวกพบว่าสารประกอบฟีนอลถูกปลดปล่อยออกจากเนื้ออัลมอนด์มาอยู่ในส่วนของน้ำที่ใช้ลวกปริมาณ 74-88%



ภาพที่ 6 ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ตัวอักษร a-e ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์นั้นไม่สามารถตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ได้เนื่องจากสารโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ เกิดปฏิกิริยากับสาร Folin ให้สารสีน้ำเงินเข้มทำให้รบกวนการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย ดังนั้นจึงไม่สามารถกล่าวได้ว่าสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มีผลต่อสารประกอบ ฟีนอลรวมในพริกแห้งหรือไม่

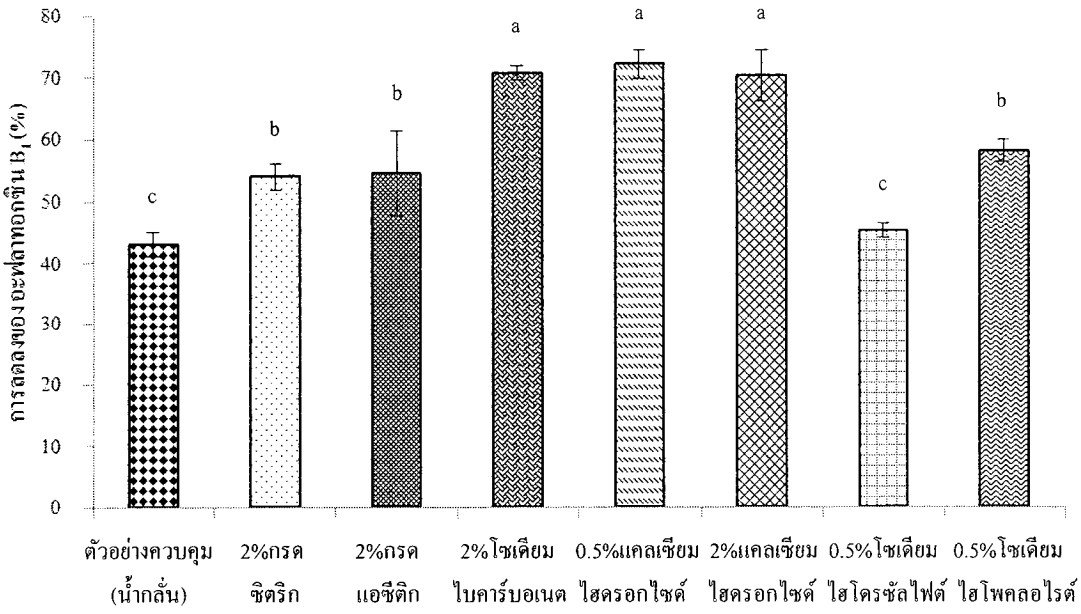
1.6 ผลของสารเคมีต่อการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดง

การศึกษาการลดอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงด้วยการแช่พริกแห้งในสารเคมีนั้นได้คัดเลือกสารเคมีที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากลักษณะปรากฏ สี และกลิ่น จากผลการทดลองข้างต้น และคำนึงถึงประสิทธิภาพในการลดสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ด้วย ซึ่งสารเคมีที่ไม่ได้รับ

การคัดเลือก คือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ ที่ความเข้มข้น 2% เนื่องจากมีกลิ่นของสารเคมีดังกล่าวติดอยู่ที่ผลพริกซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ และโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 2% ซึ่งมีผลทำให้สีของพริกแกงแดงซีดจางลง ส่วนกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นทั้งที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2% ไม่มีผลทางลบต่อลักษณะปรากฏและคุณภาพของพริกแกงแดง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารเคมีเหล่านี้ที่ระดับความเข้มข้น 2% เนื่องจากคาดว่าจะให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ดีกว่าที่ความเข้มข้น 0.5% และจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้เท่ากับ 72.4% และ 70.9% ตามลำดับ และพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้เท่ากับ 62.6% และ 70.6% ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษาผลของสารเคมีต่อการลดอะฟลาทอกซิน B_1 นั้น ชนิดของสารเคมีและระดับความเข้มข้นของสารเคมีที่เลือกใช้ประกอบด้วย สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.5% โซเดียมไฮโปคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% กรดซิตริกที่ความเข้มข้น 2% กรดแอซีติกที่ความเข้มข้น 2% โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2% และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2%

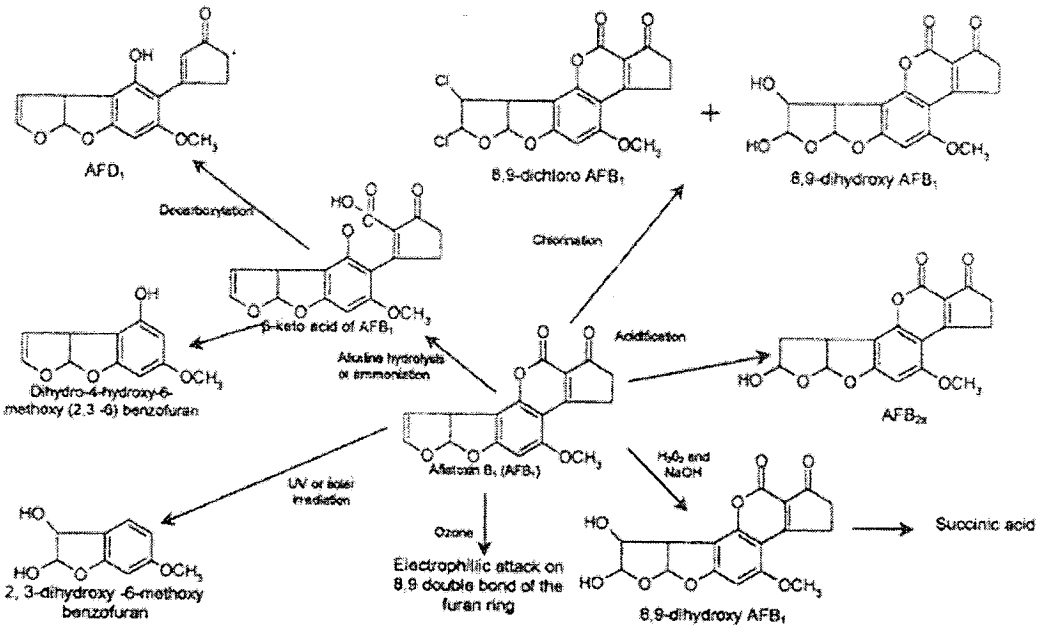
จากการเตรียมตัวอย่างสร้างการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแห้งโดยคำนวณให้มีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1 ที่ความเข้มข้น 50±10 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์ด้วยชุดทดสอบ ELISA พบว่าค่าปริมาณการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1 ในตัวอย่างที่ได้จริงเท่ากับ 44.19±0.2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งจะใช้ค่านี้ในการเปรียบเทียบกับตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งภายหลังการแช่ในสารละลายกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 2% และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ที่เหลือและปริมาณการลดลงของอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงภายหลังการล้างด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ แสดงในภาพที่ 7 จะเห็นว่าตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ความเข้มข้น 0.5% มีผลทำให้ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ลดลง 45.2% ซึ่งไม่มีความแตกต่างกับตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) ($p>0.05$) ที่มีปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ลดลง 43.0% ส่วนตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% กรดซิตริก และกรดแอซีติกที่ความเข้มข้น 2% มีผลทำให้ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ลดลง 58.0%, 54.0% และ 54.5% ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (น้ำกลั่น) อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) โดยสารละลายดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 รองจากสารละลายประเภทต่าง

ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% และ 2% และโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2% ที่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ถึง 72.1% 70.1% และ 70.5% ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ปริมาณการลดลงของอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งภายหลังจากแช่ด้วยกรดซิตริก กรดแอซีติก โซเดียมไบคาร์บอเนต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2% และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และโซเดียมไฮโพคลอไรต์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
ตัวอักษร a-c ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสาคัญ ($p \leq 0.05$)

ทั้งนี้น่าจะอธิบายได้จากการที่สารละลายกรดมีผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของอะฟลาทอกซิน B_1 เปลี่ยนไปกลายเป็นอะฟลาทอกซิน B_{2a} ในสภาวะที่มีน้ำ (ภาพที่ 8) โดยโมเลกุลของน้ำไปจับกับพันธะคู่ที่วงแหวนฟูแรน ซึ่งกรดจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Jalili *et al.*, 2011) โดยอะฟลาทอกซิน B_{2a} มีความรุนแรงน้อยกว่าอะฟลาทอกซิน B_1 มีบางรายงานที่กล่าวว่าการใช้กรดซิตริก (citric acid) และกรดแลคติก (lactic acid) ร่วมกับการแปรรูปแบบ extrusion ในข้าวฟ่าง สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้ 92% และ 67% ตามลำดับ (Mendez-Albores *et al.*, 2009)



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะฟลาทอกซิน B_1 ภายหลังจากได้รับการรักษาด้วยวิธีทางกายภาพ และวิธีทางเคมี

ที่มา: Basappa (2009)

ในกรณีของสารออกซิไดซ์สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซินได้ น่าจะเป็นผลมาจากสารออกซิไดซ์ไปจับกับพันธะคู่ของวงแหวนฟูแรน ทำให้โครงสร้างอะฟลาทอกซิน B_1 เปลี่ยนไป ปริมาณสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 จึงลดลง และผลของสารละลายด่างต่อการลดอะฟลาทอกซิน B_1 น่าจะอธิบายได้จากการที่สารละลายด่างไปจับกับวงแหวนแลคโตนในโครงสร้างอะฟลาทอกซิน B_1 ทำให้วงแหวนแลคโตนเปิดออกเกิดเป็นโครงสร้างโมเลกุลใหม่ เรียกว่า beta-keto acid (ภาพที่ 8) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี ดังนั้นจึงล้างหรือกำจัดอะฟลาทอกซินออกได้โดยง่าย (Jalili *et al.*, 2011) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Price and Jorgensen (1985) ที่รายงานว่า เมื่อดัมข้าวโพดในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% ทำให้สามารถลดปริมาณการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในข้าวโพดได้ 43%

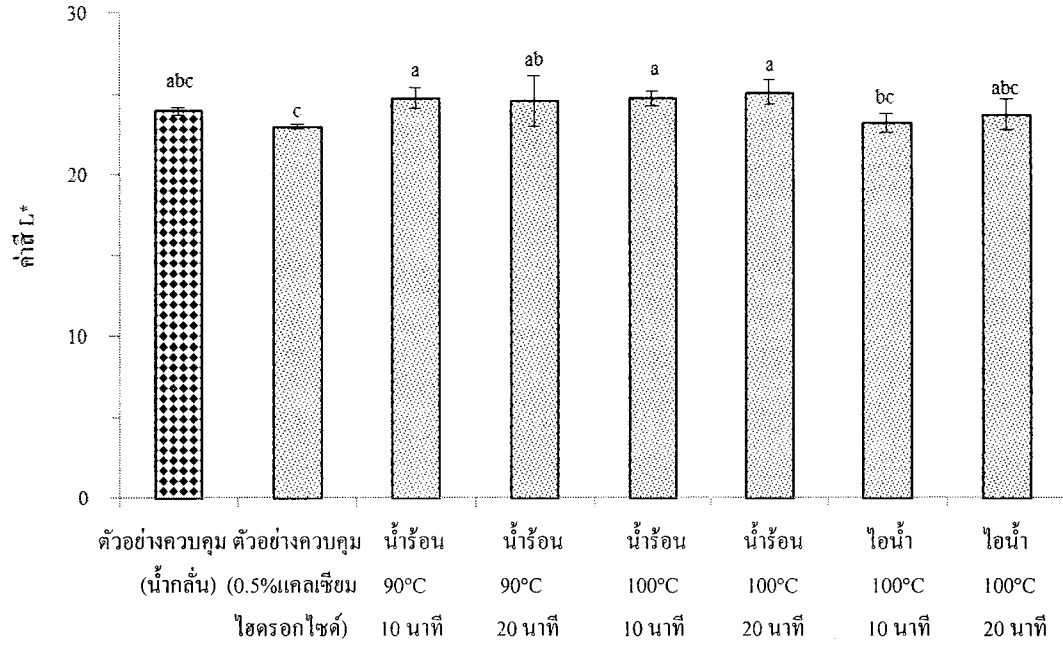
2. ผลของการใช้สารเคมีร่วมกับความร้อนต่อการลดอะฟลาทอกซิน B_1 และคุณภาพของพริกแกงแดง

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของสารเคมีและความร้อนต่อการลดอะฟลาทอกซิน B_1 และคุณภาพของพริกแกงแดงนี้ จะเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมที่สุดในการลดสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ตามผลการทดลองข้อ 1.6 ซึ่งพบว่าสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5%

สามารถลดสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ดีที่สุด คือ 72.1% โดยไม่มีผลต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของพริกแกงแดง เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการทดลอง และเป็นการใช้สารเคมีที่มีระดับความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลาย 0.5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ มาศึกษาร่วมกับการให้ความร้อนวิธีต่างๆ ประกอบด้วย การให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และการลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

2.1 ผลของสารเคมีและความร้อนต่อค่าสี (L*a*b*) ในพริกแห้ง

จากการทดลองเตรียมพริกแกงแดง ภายหลังจากการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที ทำการบดละเอียด แล้ววัดค่าด้วยเครื่องวัดสี พบว่าค่า L* หรือค่าความสว่าง ในตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C (เป็นเวลา 10 และ 20 นาที) และ 100°C (เป็นเวลา 10 และ 20 นาที) วัดค่า L* ได้เท่ากับ 24.7, 24.6, 24.7 และ 25.1 ตามลำดับ ซึ่งค่า L* ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ผ่านการแช่ด้วย 0.5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ไม่ได้รับการให้ความร้อน (ค่า L* เท่ากับ 23.0) (ภาพที่ 9) ทั้งนี้น่าจะเป็นผลมาจากตัวอย่างที่ผ่านการต้มจะมีน้ำเข้าไปแทรกอยู่ภายในเนื้อเยื่อของพริกแทนที่อากาศมากขึ้น จึงทำให้สีของพริกเด่นชัดขึ้น และเพิ่มความสว่างให้กับสีของพริกด้วย ส่วนในตัวอย่างที่ลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C (เป็นเวลา 10 และ 20 นาที) ซึ่งวัดค่า L* ได้เท่ากับ 23.2 และ 23.7 ตามลำดับ เนื่องด้วยวิธีการลวกด้วยไอน้ำร้อนดังกล่าวพริกไม่ได้สัมผัสกับน้ำโดยตรงในขณะให้ความร้อน ดังนั้นค่า L* จึงไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p>0.05$) (ตัวอย่างควบคุมคือ พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในน้ำกลั่นโดยไม่ผ่านการให้ความร้อน (ค่า L* เท่ากับ 24.0) และ พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน (ค่า L* เท่ากับ 23.0))

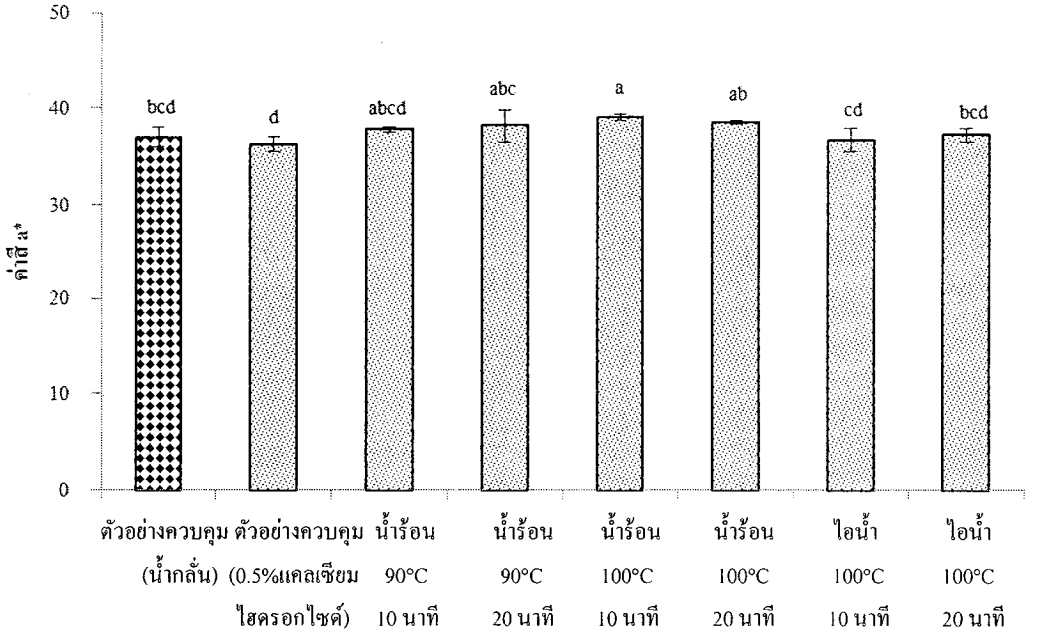


ภาพที่ 9 ค่าสี L* ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

ตัวอักษร a-c ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

สำหรับผลของค่า a* หรือสีแดงของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งแช่พริกแห้งที่แช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% แล้วให้ความร้อนต่อโดยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที 100°C เป็นเวลา 20 นาที และลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที สามารถวัดค่า a* ได้เท่ากับ 37.8, 38.1, 38.5, 36.7 และ 37.2 ซึ่งค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในน้ำกลั่นและพริกแห้งที่ผ่านการแช่สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน) ($p \leq 0.05$) (ภาพที่ 10) ส่วนตัวอย่างที่ให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที วัดค่า a*ได้เท่ากับ 39.0 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม อาจจะเป็นผลมาจากเมื่อพริกผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิสูง (100°C) ทำให้เกิดการไล่อากาศออกจากผลพริกจึงทำให้พริกมีสีแดงสดขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการต้มจาก 10 นาที เป็น 20 นาที จะมีผลทำให้ค่า a* ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก *trans* beta-carotene เปลี่ยนเป็น *cis* beta- carotene ทำให้มีสีแดงซีดลง ดังการศึกษาของ Noryati and Revathi (2006) ที่รายงานว่า ในการลวกพริกที่อุณหภูมิ 90°C เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการลวก

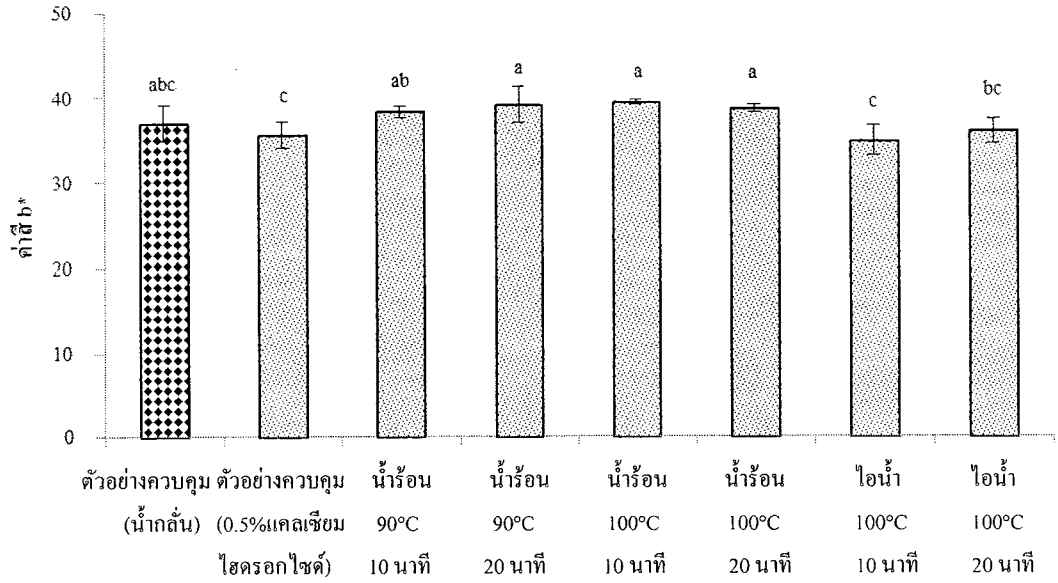
จาก 10 นาที เป็น 20 นาที จะทำให้ค่า a* ลดลงจาก 44.95 เป็น 44.86 ตามลำดับ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนจะทำให้สีแดงของพริกลดลง



ภาพที่ 10 ค่าสี a* ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

ตัวอักษร a-d ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสาคัญ ($p \leq 0.05$)

สำหรับค่า b* หรือค่าสีเหลือง พบว่า พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที จะมีค่า b* เท่ากับ 38.3, 39.1, 39.4 และ 38.7 ตามลำดับ (ภาพที่ 11) ซึ่งค่า b* จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5%โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน) ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนจะทำให้พริกแกงแดงมีสีเหลืองมากขึ้น ส่วนตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที จะมีค่า b* ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน) เนื่องจากขณะให้ความร้อนพริกไม่ได้สัมผัสกับน้ำโดยตรง



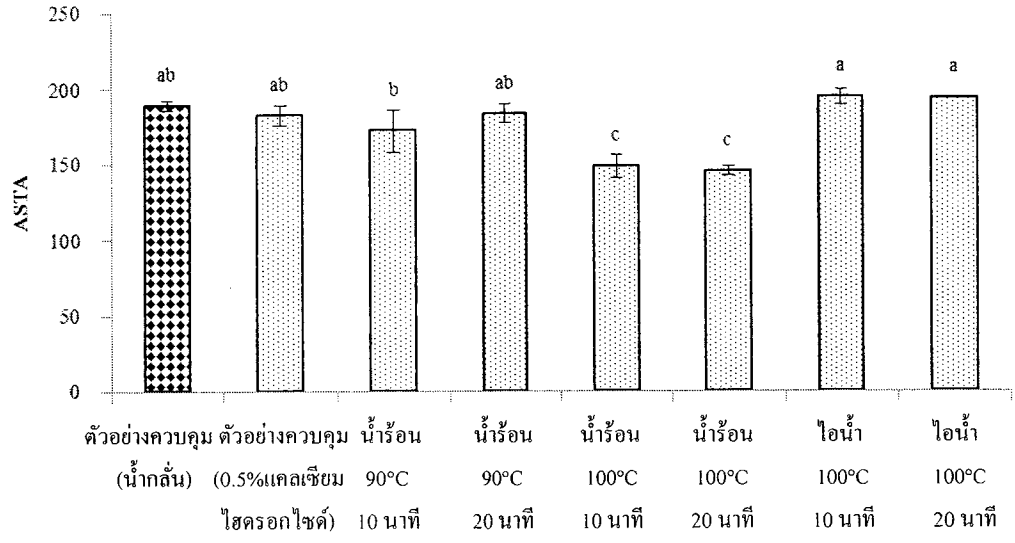
ภาพที่ 11 ค่าสี b* ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

ตัวอักษร a-c ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสาคัญ ($p \leq 0.05$)

2.2 ผลของสารเคมีและความร้อนต่อค่าความเข้มของสีแดง (ASTA)

การศึกษาผลของสารเคมีและความร้อนต่อค่าความเข้มของสีแดง โดยการเตรียมพริกแกงแดงโดยการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และการลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 12 โดยพบว่าความเข้มสีแดงของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที มีค่าความเข้มของสีแดง (ASTA เท่ากับ 148.2 และ 145.0 ตามลำดับ) ลดลงจากตัวอย่างควบคุม (พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในน้ำกลั่น และพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน ที่มีค่า ASTA เท่ากับ 189.2 และ 182.2 ตามลำดับ) ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความร้อนไปมีผลต่อโครงสร้างของ carotenoids ทำให้โครงสร้างของ carotenoids เปลี่ยนจากโครงสร้าง *trans* เป็นโครงสร้าง *cis* ทำให้ความเข้มของสีแดงลดลง ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยการลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ

100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที ค่าความเข้มสีแดงของพริกแกงแดง (ASTA เท่ากับ 194.5 และ 193.4 ตามลำดับ)ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากพริกไม่ได้สัมผัสกับน้ำโดยตรงจึงไม่ทำให้เกิดสีซีดจาง

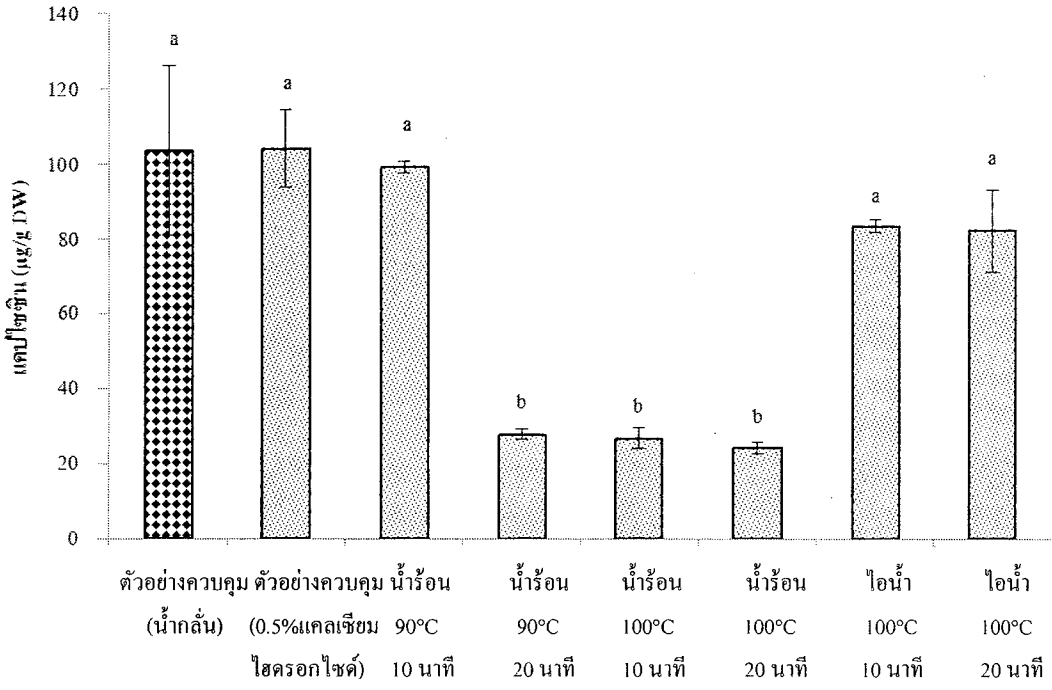


ภาพที่ 12 ค่าความเข้มสีแดง (ASTA) ของพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที
ตัวอักษร a-c ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

2.3 ผลของสารเคมีและความร้อนต่อปริมาณแคปไซซินในพริกแกงแดง

จากการเตรียมพริกแกงแดงภายหลังจากการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C, 100°C และการลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที แล้วนำมาบดละเอียด พบว่า เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณแคปไซซินที่คงเหลือในพริกด้วยการสกัดด้วยเมทานอล แล้ววิเคราะห์ด้วย HPLC จากผลการทดลองในภาพที่ 13จะเห็นได้ว่าพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที และ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที (ปริมาณแคปไซซินเท่ากับ 27.9 26.8 และ 24.2 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) จะมีปริมาณแคปไซซินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ในน้ำ

กลั่น, แช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% ไม่ผ่านการให้ความร้อน มีปริมาณแคปไซซินคงเหลือ 103.7 และ 104.2 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) และพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 10 นาที มีปริมาณแคปไซซินคงเหลือ 99.2 ไมโครกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ลดลง 4.8% จากตัวอย่างควบคุม 0.5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ไม่ผ่านการให้ความร้อน) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที และ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที (ลดลง 73.2% 74.3% และ 76.8% จากตัวอย่างควบคุมที่แช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% แล้วไม่ผ่านการให้ความร้อน ตามลำดับ) เนื่องจากความร้อนสูงมีผลทำให้ปริมาณแคปไซซินลดลง ซึ่งแคปไซซินมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 65°C สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Schweiggert *et al.* (2006) ที่รายงานว่า ปริมาณแคปไซซินอยด์ในพริกลดลง 21.7-28.3% เมื่อลวกพริกในน้ำร้อนอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 5 นาที และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการลวกก็ยิ่งทำให้เกิดการสูญเสียแคปไซซินอยด์มากขึ้น ขณะที่พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที มีปริมาณแคปไซซินคงเหลือไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมเนื่องจากพริกไม่ได้สัมผัสกับน้ำร้อนโดยตรงจึงทำให้สารแคปไซซินในพริกไม่ถูกทำลาย



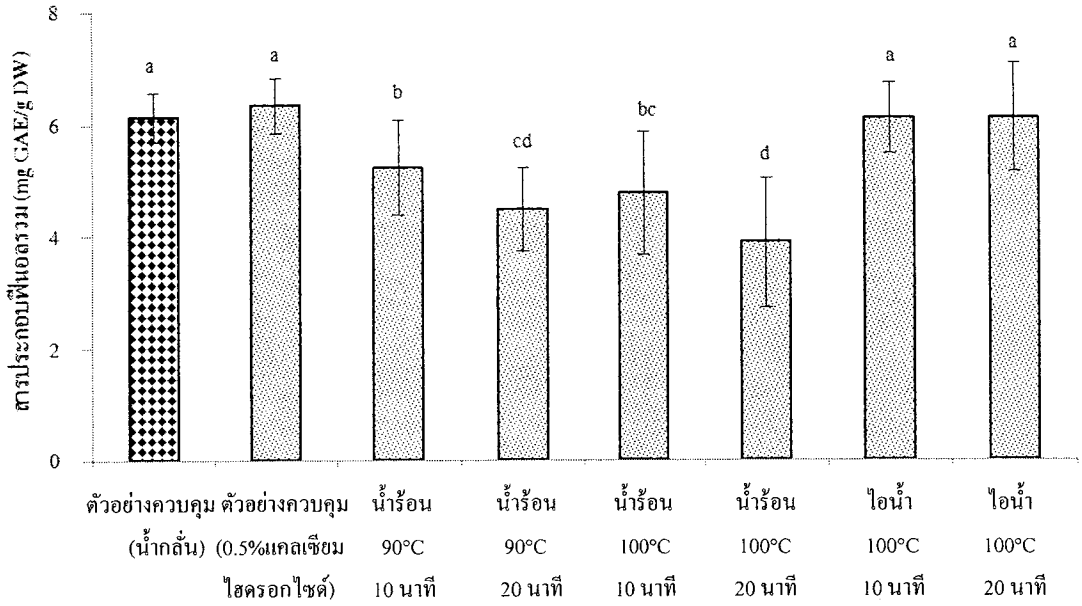
ภาพที่ 13 ปริมาณแคปไซซินในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

ตัวอักษร a-c ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสาคัญ ($p \leq 0.05$)

2.4 ผลของสารเคมีและความร้อนต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม

จากการทดลองเตรียมพริกแกงแดงภายหลังจากการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C และ 100 °C และลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที พบว่าตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% แล้วผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม กล่าวคือ ตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C มีปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมอยู่ในช่วง 3.9-5.2 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ภาพที่ 14) ส่วนตัวอย่างควบคุม (พริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่แช่ในน้ำกลั่น และสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5% ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน) วัดปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมได้

เท่ากับ 6.2 และ 6.3 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนจากอุณหภูมิ 90°C เป็น 100°C ที่ระยะเวลาให้ความร้อนเท่ากัน ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) ส่วนระยะเวลาการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม โดยพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อน ดังเช่นการลวกพริกแห้งในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนจาก 10 นาที เป็น 20 นาที ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในพริกแกงแดงที่วัดได้ลดลงจาก 5.2 เป็น 4.5 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วนการลวกพริกแห้งในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนจาก 10 นาที เป็น 20 นาที ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในพริกแกงแดงที่วัดได้ลดลงจาก 4.8 เป็น 3.9 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่การเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนด้วยการลวกด้วยไอน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C ไม่มีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม น่าจะมีสาเหตุเนื่องมาจากการลวกตัวอย่างพริกแห้งด้วยน้ำร้อนโดยตรง มีผลทำให้สารประกอบฟีนอลรวมในพริกถูกชะไปอยู่ในส่วนของน้ำที่ใช้ลวก จึงทำให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลลดลงได้ ดังรายงานของ Hugheya *et al.* (2012) ที่กล่าวว่าเมื่อลวกเมล็ดอัลมอนด์ในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C และ 100°C เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดการชะเอาสารประกอบฟีนอลที่ผิวเมล็ดอัลมอนด์ไปอยู่ในส่วนของน้ำที่ใช้ลวกประมาณ 30% (25°C) และ 90% (100°C) และยิ่งเพิ่มระยะเวลาในการลวกมากขึ้นก็จะทำให้เกิดการสูญเสียสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 14 ปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที
ตัวอักษร a-d ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสาคัญ ($p \leq 0.05$)

2.5 ผลของสารเคมีและความร้อนต่อการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดง

การศึกษาการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในสารเคมีร่วมกับการใช้ความร้อนจะเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมและสามารถลดสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ดีที่สุดจากผลการทดลองข้อที่ 1.6 สารเคมีดังกล่าวคือ 0.5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ นำพริกแห้งที่สร้างการปนเปื้อนเทียมด้วยอะฟลาทอกซิน B_1 (ความเข้มข้นสารพิษอะฟลาทอกซินเริ่มต้น 39.5±3.2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) แช่ในสารละลาย 0.5% แคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาผ่านการให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำร้อนอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที แล้วบดละเอียด จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 คงเหลือในพริกด้วย HPLC เพื่อให้ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ที่เหลือในตัวอย่างพริกแกงแดงสามารถวัดได้ทุกตัวอย่าง เนื่องจากการวิเคราะห์ปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ด้วยวิธี HPLC มีค่า Limit of Detection (LOD) และ Limit of Quantitation (LOQ) ที่ต่ำกว่า ELISA กล่าวคือ HPLC จะมีค่า LOD เท่ากับ 0.05 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่า LOQ เท่ากับ 0.15 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ส่วน

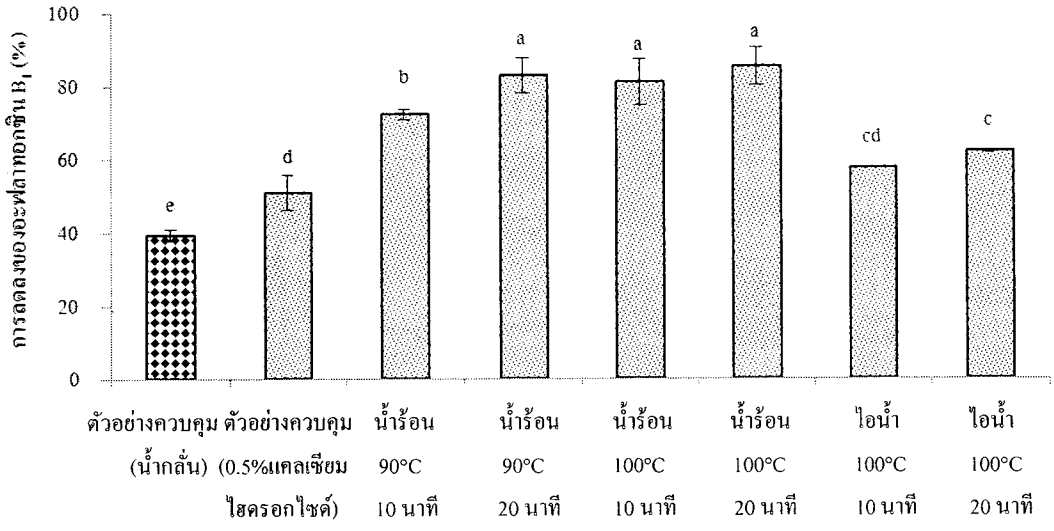
ELISA จะมีค่า LOD เท่ากับ 2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และมีค่า LOQ เท่ากับ 2 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม

จากผลการทดลองในภาพที่ 15 พบว่าการเตรียมพริกแกงแดงโดยการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% ร่วมกับการให้ความร้อนทุกวิธีสามารถลดการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงได้ กล่าวคือการให้ความร้อนด้วยการลวกพริกแห้งในน้ำร้อน (90 และ100°C) สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงได้ 72.1-85.3% ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าการให้ความร้อนด้วยการลวกด้วยไอน้ำร้อน (100°C) ที่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้เพียง 57.6-62.1% (ภาพที่ 15) อีกทั้งยังพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนจะช่วยลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้สูงขึ้นที่ระยะเวลาการให้ความร้อนเท่ากัน ดังเช่นที่ระยะเวลาการให้ความร้อนคือ 10 นาที พบว่าตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จะสามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 72.1% ส่วนตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C จะสามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ 81.0% และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการลวกจะช่วยให้ลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1ได้สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนจาก 10 นาทีเป็น 20 นาที พบว่าสามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1ได้สูงขึ้นจาก 72.1% เป็น 82.9%

ดังนั้นจากผลการทดลองข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าวิธีการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการลดอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดง คือการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที 100°C เป็นเวลา 10 นาที และ 100°C เป็นเวลา 20 นาที ที่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้สูงถึง 82.9%, 81.0% และ 85.3% ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที ที่สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ได้สูงสุด (85.3%) ซึ่งน่าจะมีผลมาจากการที่ด่างไปจับกับวงแหวนแลคโตนภายในโครงสร้างของอะฟลาทอกซิน B_1 ทำให้วงแหวนแลคโตนเปิดออกเกิดเป็นโครงสร้างโมเลกุลใหม่ เรียกว่า beta-keto acid ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี (Jalili *et al.*, 2011) และความร้อนก็มีส่วนช่วยลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ด้วย ดังนั้นจึงล้างหรือกำจัดอะฟลาทอกซิน B_1 ออกได้โดยง่ายในระหว่างการลวกในน้ำร้อน เพราะพริกได้สัมผัสกับน้ำโดยตรง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Price and Jorgensen (1985) ที่รายงานว่า เมื่อต้มข้าวโพดในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% ทำให้สามารถลดปริมาณการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในข้าวโพดได้ถึง 43% อีกทั้ง Camou-Arriola and Price (1989) ได้รายงานว่าเมื่อต้มข้าวโพดที่มีการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินโดยธรรมชาติที่ความเข้มข้น 1,600

ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3% ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 นาที สามารถลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 และอะฟลาทอกซิน B_2 ได้ 93% และจากการศึกษาของ Hwang and Lee (2006) ที่รายงานว่า เมื่อต้มข้าวสาลีในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 100±2°C เป็นเวลา 15 นาที สามารถลดปริมาณการปนเปื้อนอะฟลาทอกซินในข้าวสาลีแห้งได้ถึง 71%

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 20 นาที มีผลกระทบในทางลบต่อคุณภาพของพริกแกงแดง (ค่าความเข้มสีแดง ปริมาณแคปไซซิน และปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม) ที่รุนแรงกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที และการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที อย่างไรก็ตามพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที จะมีค่าความเข้มของสีแดงลดลงมากกว่าพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลกระทบต่อคุณภาพของพริกแกงแกงร่วมกับประสิทธิภาพในการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 อาจกล่าวได้ว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการลดสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดง



ภาพที่ 15 ปริมาณการลดลงของอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

ตัวอักษร a-e ที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

3. ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

เนื่องจากผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาถึงการนำวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการลดปริมาณอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแกงแดง (นำพริกแห้งแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำมาลวกในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำมาบดละเอียด) มาใช้จริงในการประกอบอาหารเพื่อการบริโภค ผู้วิจัยได้เลือกน้ำแกงแดง (Red curry) มาเป็นอาหารตัวอย่างในการทดลองนี้ จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสน้ำแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งภายหลังจากการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วให้ความร้อนด้วยวิธีการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมซึ่งเป็นน้ำแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ผ่านการแช่ในน้ำและไม่ผ่านการให้ความร้อน ด้วยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีทดสอบความแตกต่างแบบ Triangle test ระหว่างตัวอย่างน้ำแกงแดงที่เตรียมจากพริกแห้งที่ถูกเตรียมดังวิธีการข้างต้น จากผลการทดลองพบว่าจากผู้ทดสอบทั้งหมด 30 คน มีผู้ทดสอบที่สามารถแยกความแตกต่างของตัวอย่างได้ถูกต้องจำนวน 11 คน และมีผู้ทดสอบที่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของตัวอย่างได้ถูกต้องจำนวน 19 คน เมื่อทดสอบทางสถิติด้วย chi-square test พบว่า ตัวอย่างน้ำแกงแดงทั้งสองสูตรไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสภาวะที่ดีที่สุดที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการผลิตพริกแกงแดงดังกล่าวให้ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม (แช่พริกแห้งในน้ำและไม่ผ่านการให้ความร้อน)

สรุปผล

จากการศึกษาชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแห้งซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพริกแกงแดงโดยใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน

โดยเปรียบเทียบการแช่พริกแห้งในสารเคมี 3 กลุ่ม ประกอบด้วย สารเคมีประเภทกรด (กรดซิตริก, กรดแอซีติก) ด่าง (โซเดียมไบคาร์บอเนต, แคลเซียมไฮดรอกไซด์) และสารออกซิไดส์ (โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์, โซเดียมไฮโพคลอไรต์) ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 2% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% สามารถลดอะฟลาทอกซิน B_1 ได้สูงถึง 72.1% โดยไม่ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางเคมีของพริกแห้ง และจากการศึกษาการแช่พริกแห้งในสารละลายนี้ร่วมกับการให้ความร้อน (ลวกด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 และ 100°C และลวกด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 และ 20 นาที) พบว่าความร้อนช่วยกำจัดอะฟลาทอกซิน B_1 ได้มากขึ้น โดยวิธีการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุดคือการลวกในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งสามารถลดการปนเปื้อนของอะฟลาทอกซิน B_1 ได้ถึง 82.9% ดังนั้นการนำพริกแห้งมาแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นให้ความร้อนโดยการลวกในน้ำร้อน อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 20 นาที จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการลดการปนเปื้อนอะฟลาทอกซิน B_1 ในพริกแห้ง และจากการนำพริกแห้งที่แช่และให้ความร้อนที่สภาวะนี้มาเตรียมเป็นพริกแกงส้มสำหรับทำน้ำแกงส้มมาทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าผู้บริโภคไม่สามารถแยกความแตกต่างกับแกงส้มที่เตรียมจากพริกแกงส้มสูตรปกติได้

จากผลการศึกษานี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตพริกแกง ซึ่งในกระบวนการผลิตพริกแกงในระดับอุตสาหกรรมจะมีขั้นตอนการล้างเพื่อล้างสิ่งปนเปื้อนออกจากพริกแห้ง และมีการให้ความร้อนแก่พริกแห้งเพื่อทำลายเอนไซม์พอร์ลิฟีนอลออกซิเดส (PPO) เป็นการป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์พริกแกงอยู่แล้วดังนั้นเพียงเพิ่มขั้นตอนการแช่พริกแห้งในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5% ก่อนขั้นตอนการล้าง จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์พริกแกงที่มีความปลอดภัยจากสารพิษอะฟลาทอกซิน B_1 แก่ผู้บริโภคมากขึ้น