บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ปลาดุก

ปลาดุกด้าน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Clarias batrachus* Linnaeus และมีชื่อภาษาไทยเรียกแตกต่างกันตามพื้นที่ เช่น ดุกเลา ดุกแดง ดุกเอ็น และ ดุกเผือก เป็นต้น (ทวี และ จินตนา, 2541) เป็นปลาน้ำจืด จำพวกไม่มีเกล็ด ลำตัวเรียวยาว มีถิ่นกำเนิดใน เขตร้อน แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น พม่า อินเดีย ลาว กัมพูชา เวียดนาม และ ไทย (เฉิดฉัน และคณะ, 2538) ปลาดุกด้านขนาดเล็กจะกินอาหารจำพวกโปรโตซัว ไรน้ำขนาดเล็ก และ แพลงตอนพืช ปลาดุกที่มีขนาดใหญ่ จัดเป็น omnivorous เนื่องจาก กินอาหารทั้งพืช และ สัตว์ บางครั้งก็จัดเป็นพวก scavenger เพราะกินอาหารจำพวกเศษเนื้อที่กำลังสลายตัว (ทวี และ จินตนา, 2541) ชอบอาศัยอยู่ในบริเวณพื้นโคลน ไม่ชอบน้ำใส อยู่ได้ทั้งในน้ำนิ่ง และ น้ำไหล นำมาเลี้ยงได้ดีในบ่อเลี้ยง ซึ่งดัดแปลงให้มีลักษณะใกล้เคียงกับธรรมชาติ วางไข่ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ชอบวางไข่ภายในโพรงตามชายบ่อหรือริมตลิ่งที่ลึกจากระดับผิวน้ำประมาณ 20 – 50 cm การวางไข่จะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับความอ่อนแก่ของไข่ และ น้ำเชื้อ รวมทั้งสภาพของสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิของน้ำ แม่ปลาดุกด้านแต่ละตัวจะมีไข่มากน้อยขึ้นอยู่กับ ขนาด และ อายุของปลาเป็นสำคัญ แม่ปลาที่มีความยาวในช่วง 20 – 32 cm ให้ไข่ระหว่าง 5,200 – 25,210 ฟอง (เฉิดฉัน และคณะ, 2538)

ปลาดุกด้าน เป็นปลาน้ำจืด ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่ง ซึ่งกรมประมงส่งเสริมให้ประชาชนเพาะเลี้ยงกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก โตเร็ว อดทนต่อสิ่งแวดล้อม เนื้อมีกลิ่นดีและรสนุ่มหวาน จากสถิติปริมาณสัตว์น้ำจืดที่จับได้ทั้งหมด (รวมเพาะเลี้ยง) ปีพ.ศ. 2538 พบว่าปริมาณสัตว์น้ำจืดที่จับได้ทั้งหมด 387,700 ตัน คิดเป็นมูลค่า 9,889.6 ล้านบาท เป็นปลาดุก 52,200 ตัน มีมูลค่า 1,339.3 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 13.54 ของมูลค่าสัตว์น้ำจืดที่จับได้ทั้งหมด นับเป็นปลาน้ำจืดที่จับได้มากเป็นอันดับ 3 รองจากปลานิล และ ปลาตะเพียน ปลาดุกด้านนอกจากจะบริโภคสดแล้ว ยังมีผู้นำไปแปรรูปเป็น ปลาตากแห้ง ทำเค็ม นึ่ง ย่าง รมควัน และ ผลิตภัณฑ์อื่นๆที่นิยมบริโภคภายในประเทศ (สถิติและสารสนเทศการประมง, 2538)

การรมควันผลิตภัณฑ์อาหาร

การรมควัน เป็นวิธีดั้งเดิมในการถนอมอาหาร จุดประสงค์ของการรมควัน คือ พัฒนาสีและกลิ่นรส ถนอมอาหาร พัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ และ ป้องกันการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (Pearson และ Gillett, 1996) โดยทั่วไป การรมควันจะประกอบด้วย 3 กระบวนการ คือ การใส่เกลือ (curing) การทำให้แห้งหมาด (draining) และการรมควัน (smoking)

การใส่เกลือ มีผลในการให้รสชาติ และ ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ การใส่เกลือมี 2 แบบ คือ ใช้น้ำเกลือ (brine curing) และ แบบแห้ง (dry curing) โดยการซึมของเกลือเข้าสู่ผลิตภัณฑ์แบบใช้น้ำเกลือ เกิดได้สม่ำเสมอและทั่วทั้งชิ้นอาหารในเวลาค่อนข้างสั้น ส่วนการใส่เกลือแบบแห้งต้องใช้เวลานานกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีลักษณะแห้ง จึงสามารถทำแห้งหรือลดปริมาณความชื้นได้เร็วกว่า (Waterman, 1976)

การทำให้แห้งหมาด เป็นการกำจัดน้ำที่เกาะติดที่ผิว และ ระเหยความชื้นในผลิตภัณฑ์บริเวณผิวนอกออกไป เพื่อให้ผิวเกิดความมันเงา (glossy) ซึ่งมีผลทำให้ควันจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้อย่างสม่ำเสมอ ในการทำให้แห้งหมาด จะนำผลิตภัณฑ์ที่ใส่เกลือแล้ว ผึ่ง หรือวางบนชั้น (rack) แล้วทิ้งให้แห้งหมาดในอากาศ หรือ เครื่องอบรมควันแบบ mechanical kiln (Pigott และ Tucker, 1990)

การรมควัน นอกจากเป็นการถนอมรักษาผลิตภัณฑ์แล้ว ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกลิ่นรสเฉพาะให้กับอาหาร และ ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดสีสวยชวนบริโภค โดยทั่วไปวิธีการรมควันมี 2 วิธี คือ การรมควันแบบเย็น และ การรมควันแบบร้อน (Girard, 1992) การรมควันแบบเย็น FAO/WHO Codex Alimentarius Commission (1983) ให้คำจำกัดความว่า เป็นวิธีการรมควันที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งไม่ทำให้โปรตีนของผลิตภัณฑ์เกิดการจับก้อน (coagulate) เนื่องจากความร้อน Pigott และ Tucker (1990) รายงานว่า อุณหภูมิในการรมควันเย็นต้องไม่เกิน 35 °C และใช้เวลาในกระบวนการผลิตนาน ผลิตภัณฑ์จากวิธีนี้ จะเก็บได้ไม่นาน มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพสด และ มีการสูญเสียคุณภาพน้อย การรมควันแบบนี้ ไม่สามารถทำได้ในประเทศแถบร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศสูงอยู่แล้ว (นงนุช, 2530) การรมควันแบบร้อน FAO/WHO Codex Alimentarius Commission (1983) ให้คำจำกัดความว่า เป็นวิธีการรมควันที่ใช้อุณหภูมิสูง หรือ ระยะเวลานานเพียงพอที่จะทำให้โปรตีนเกิดการจับก้อนเนื่องจากความร้อน Pigott และ Tucker (1990) รายงานว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการรมควันโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 80-115°C แต่ในบางกระบวนการอาจสูงถึง 120°C หรือมากกว่า และใช้เวลานานจนบริเวณกึ่งกลางของผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิ 82.2°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรมควันร้อนมีความชื้นค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 60-70 โดยน้ำหนัก ในกระบวนการรมควันแบบนี้จะนำผลิตภัณฑ์ที่แห้งหมาดแล้ว มาอบที่อุณหภูมิ 50 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวหน้าผลิตภัณฑ์แห้ง เกิดความมันเงา และ มีผลทำให้ควันจับผิวหน้าได้ดี จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60 – 80°C และใช้

เวลาในการรมควันรวมทั้งสิ้นประมาณ 3 – 4 ชั่วโมง โดยขึ้นกับขนาดของชิ้นผลิตภัณฑ์ (ปรทิพย์, 2532)

ควันและแหล่งควัน

ควันที่ใช้รมอาหาร นอกจากจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีสีเหลืองน่ารับประทานแล้ว ยังช่วยให้มีกลิ่นรสพิเศษเฉพาะตัว วัสดุให้ควันที่นิยมใช้ในต่างประเทศ คือ ไม้โอ๊ค ไม้ฮิคคอรี่ ส่วนในประเทศไทยนิยมใช้ ขี้เลื่อย กาบมะพร้าว ซังข้าวโพด และ ชานอ้อย (ภานุวัฒน์, 2537) วัสดุหรือเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นแหล่งควันสำหรับรมอาหาร มีองค์ประกอบส่วนใหญ่ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน องค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ resins และ essential oil โดยทั่วไปวัสดุหรือเชื้อเพลิงที่ให้ควัน มีสัดส่วนของเซลลูโลส ต่อ เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็น 2 : 1 : 1 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ประเภทของไม้ที่ใช้ โดยไม้เนื้ออ่อน จะมีลิกนินสูงกว่า ไม้เนื้อแข็ง (Gilbert และ Knowles, 1975; Girard, 1992)

เซลลูโลส เป็น polysaccharide ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยส่วนของกลูโคส 100 – 1,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 glucosidic ขณะเผาไหม้เชื้อเพลิง เซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยา pyrolysis ซึ่งมี 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก เกิด acid hydrolysis ตามด้วย dehydration ได้ 1,6-anhydroglucose หรือ β - glucosan ขั้นตอนต่อมา เกิดการสร้าง กรดอะซิติก น้ำ furans และ phenols ขึ้น (Gilbert และ Knowles, 1975; Girard, 1992)

เฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วย pentosan 3-6 % และ hexosan 11-15 % ปฏิกิริยา pyrolysis ของ pentosan ทำให้เกิด furfural, furan และ อนุพันธ์ของสารทั้งสองชนิด ในขณะที่ pyrolysis ของ hexosan จะทำให้เกิด กรดอะซิติกและอนุพันธ์ของกรดอะซิติก (Girard, 1992; Pearson และ Gillett, 1996)

ลิกนิน เป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการสลายตัวจะให้สารประกอบ phenols, phenolic ethers และอนุพันธ์ของสารทั้งสองชนิด เช่น guaiacol (2-methoxyphenol), syringol (1,6-dimethoxyphenol) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้กลิ่นควัน (smoky aroma) ไม้เนื้อแข็งต่างจากไม้เนื้ออ่อน ที่โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน เมื่อเกิดการเผาไหม้จะให้ syringols ที่มีสมบัติเป็นสารให้กลิ่นควัน ในขณะที่ ไม้เนื้ออ่อน จะให้ guaiacols ที่ให้รสชาติของควัน (smoke taste) โดยกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์รมควันเกิดจากสารทั้งสองชนิดร่วมกัน (Gilbert และ Knowles, 1975; Girard, 1992)

ควันที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนอนุภาคของแข็งและของเหลว กับส่วนที่เป็นไอ ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้ ประกอบด้วย สารประกอบต่าง ๆ มากกว่า 200 ชนิด สารดังกล่าวแยกประเภทตามโครงสร้างได้เป็น สารประกอบฟีนอล สารประกอบคาร์บอนิล

กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ ไฮโดรคาร์บอน และ ก๊าซต่าง ๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ออกซิเจน และ ไนโตรเจน (Daun, 1979)

สารประกอบฟีนอล พบประมาณ 20 ชนิด เช่น guaiacol, 4-methylguaiacol, phenol, 4-ethylguaiacol, o-cresol, m-cresol, 4-propylguaiacol, eugenol (4-allylguaiacol), 4-vinylguaiacol, vanillin, 2,6-dimethoxyphenol, 2,6-dimethoxy-4-methylphenol, 2,6-dimethoxy-4-propylphenol และ 2,6-dimethoxy-4-ethylphenol เป็นต้น บทบาทที่พบในอาหารรมควัน คือ ชลอการเกิดออกซิเดชันของไขมัน ยับยั้งการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ และ ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีสี และ กลิ่นรสที่ดี (Clifford, Tang และ Eyo, 1980)

สารประกอบคาร์บอนิล และ กรดอินทรีย์ ได้แก่ 2- pentanone, valeraldehyde, 2-butanone, crotonaldehyde หรือ กรดที่มีคาร์บอน 1- 4 อะตอม มีผลในการให้สีแก่อาหารรมควันจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบ Maillard ของสารประกอบคาร์บอนิล กับ โปรตีนในผลิตภัณฑ์อาหาร เกิดสารประกอบที่ให้สีน้ำตาลแก่ผลิตภัณฑ์รมควัน (Pearson และ Gillett, 1996)

แอลกอฮอล์ และ ก๊าซต่างๆ ที่พบในอาหารรมควัน ได้แก่ เมทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ออกซิเจน และ ไนโตรเจน มีบทบาทในอาหารรมควันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีผลในการยับยั้งจุลินทรีย์ และ ให้สีแก่ผลิตภัณฑ์ (Pearson และ Gillett, 1996)

ส่วนที่เป็นอนุภาคของแข็งและของเหลว ประกอบด้วย เขม่า และ สารประกอบ polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เนื่องจากสารดังกล่าวไม่มีส่วนในการถนอมรักษา หรือ เพิ่มรสชาติให้แก่ผลิตภัณฑ์รมควัน (Chandrasekhar และ Kaveriappa, 1985) พบสารเหล่านี้ในอาหารรมควันประมาณ 20 ชนิด ตัวอย่างเช่น benz(a)anthracene, dibenz (a,h)anthracene, benz(a)pyrene, benz(e)pyrene, benzo(g, h, i)perylene, pyrene และ 4-methyl pyrene (Pearson และ Gillett, 1996) โดยเฉพาะ benzo(a)pyrene (BaP) ซึ่งนอกจากเป็น PAH ที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็งสูงที่สุดแล้ว ยังมีผลทำให้ phenol และ PAHs อื่นๆ ที่ไม่เป็นสารก่อมะเร็งกลายเป็นสารร่วมก่อมะเร็ง (Larsson, 1982; Sikorski, 1988; Girard, 1992; Chen, 1997) Lo และ Sandi (1979) กับ Roda และคณะ (1999) กล่าวว่า ปริมาณ BaP ที่พบในอาหารปิ้งย่าง ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ใบชา แฮมรมควัน ปลาเฮอร์ริงรมควัน เป็น 190, 55, 21, 3.2, 1 ppb ตามลำดับ มีรายงานว่า ประชากรแถบบอลติกและไอซ์แลนด์ ที่บริโภคปลารมควันในปริมาณสูง มีแนวโน้มการเป็นมะเร็งสูงกว่าประชากรแถบอื่น และ จากการศึกษาทางระบาดวิทยา (epidemiology) พบว่าประชากรแถบไอซ์แลนด์ที่บริโภคผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์รมควัน มีอัตราการเป็นมะเร็งกระเพาะอาหารสูง (Alonge, 1988; Pearson และ Gillett, 1996)

เบนโซ(เอ)ไพรีน และ กลไกการก่อมะเร็ง

เบนโซ(เอ)ไพรีน เป็น PAH ที่มีวงแหวนเบนซีน 5 วง สูตรทางเคมีเป็น $C_{20}H_{12}$ น้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 252 ผลึกมีลักษณะสีเหลือง จุดเดือด 310-312 °C จุดหลอมเหลว 179 °C มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่ละลายใน benzene, toluene, xylene (Lewis, 1997) เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหรือแหล่งควันที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจาก อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูง ทำให้สารประกอบที่ระเหยได้ สลายตัวเป็นอนุพันธ์ methylene จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยา dimerization, polymerization, ring formation และ dehydrogenation ได้เป็นสารประกอบ BaP ขึ้น กฎหมายอาหารของประเทศเยอรมัน (German legislation) กำหนดปริมาณสูงสุดของ BaP ที่ยอมให้มีในอาหารรมควัน 1 ppb (Girard, 1992; Pearson และ Gillett, 1996)

เมื่อ BaP เข้าสู่เซลสิ่งมีชีวิต จะเหนี่ยวนำให้ cytochrome P450 เพิ่มกิจกรรม และ เพิ่มการสร้างเอนไซม์บางชนิด ได้แก่ monooxygenase และ epoxide hydrolase เพื่อนำมาใช้ในการเปลี่ยน BaP ไปเป็น benzo(a)pyrene7,8-dihydrodiol-9,10-epoxide ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการเมตาบอลิซึม โดยผลิตภัณฑ์นี้มีศักยภาพในการจับกับ guanine ในดีเอ็นเอ ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และ นำไปสู่การเกิดมะเร็งในที่สุด (Hart, Hart และ Craine, 1995; Bartoszek,1997; Chen, 1997) Sikorski (1988) กล่าวว่า วิตามินเอ และ สาร antioxidants อื่นๆ เช่น BHA และ BHT สามารถยับยั้งเมตาบอลิซึมของ PAHs ที่ชักนำให้เซลเกิดมะเร็งได้

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเบนโซ(เอ)ไพรีนในอาหารรมควัน

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเบนโซ(เอ)ไพรีนในอาหารรมควัน มีหลายปัจจัย ได้แก่ เทคโนโลยีการรมควัน อุณหภูมิการเผาไหม้ ชนิด องค์ประกอบ ความชื้นของไม้ที่เป็นแหล่งควัน อุณหภูมิภายในตู้รมควัน ปริมาณไขมันของเนื้อสัตว์ บรรจุภัณฑ์ และ เวลาในการเก็บผลิตภัณฑ์ (Tilgner และ Daun, 1969; Rhee และ Bratzler, 1970; Simko, 1991)

เทคโนโลยีการรมควัน

แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การรมควันแบบดั้งเดิม (tradition smoking) และ แบบสมัยใหม่ (modern smoking) การรมควันแบบดั้งเดิม เป็นการรมควันโดยปล่อยให้ควันที่ผลิตได้สัมผัสกับอาหารโดยตรง ไม่มีการควบคุมภาวะที่ใช้เผาไหม้ไม้และรมควัน รวมทั้งไม่แยกสารประกอบ hydrocarbons ออกจากควัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี BaP ในปริมาณที่สูง ในขณะที่ การรมควันแบบสมัยใหม่ มีการพัฒนาตู้รมควัน ด้วยการแยกแหล่งผลิตควัน (smoke generator) ออกจากตู้รมควัน

(smoke chamber) มีการควบคุมความหนาแน่น อัตราหมุนเวียนของควัน และ อุณหภูมิที่ใช้เผาไหม้ไม้ ก่อนควันเข้าสู่ตู้รมควัน อาจผ่านการกรอง การฉีดพ่นน้ำ overheated steam (Girard, 1992; Roda และคณะ, 1999) Moodie (1970) และ Sikorski (1988) กล่าวว่า การรมควันแบบสมัยใหม่ที่ใช้วิธี electrostatic precipitation มีการแยกของแข็งออกจากควัน ทำให้ปริมาณ BaP ในควันที่ใช้รมอาหารลดลงถึง 66% และ Sikorski (1988) รายงานว่า ปริมาณ BaP ที่พบในปลารมควันด้วยวิธี electrostatic precipitation มีค่า 0.7-1.7 ppb ในขณะที่ การรมควันแบบดั้งเดิม มีค่าอยู่ในช่วง 4.15 – 60 ppb ซึ่งสอดคล้องกับคำกล่าวของ Thorsteinsson (1969) ที่รายงานว่า ผลิตภัณฑ์รมควันแบบดั้งเดิมมีปริมาณ PAHs และ BaP สูงกว่าการรมควันแบบสมัยใหม่ หรือทางการค้า เนื่องจาก ใช้ควันและ ระยะเวลาการรมควันที่นาน Karl และ Leinemann (1996) วัดปริมาณ BaP ของปลารมควันที่ผ่านการรมควันแบบดั้งเดิม เปรียบเทียบกับแบบสมัยใหม่ พบว่าแบบดั้งเดิมมี 0.2 - 4.1 ppb ซึ่งสูงกว่าแบบสมัยใหม่ที่มีเพียง 0.1 ppb Karl (1997) ศึกษาการรมควันแบบดั้งเดิม และ สมัยใหม่ต่อปริมาณ BaP ในปลา mackerel รมควัน ที่ใช้เวลาในการทำแห้ง และ รมควันรวม 3 - 3.5 ชั่วโมง พบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการรมควันแบบดั้งเดิม มีปริมาณ BaP สูงกว่าการรมควันด้วยวิธีสมัยใหม่เกือบ 10 เท่า Roda และคณะ (1999) ศึกษาผลของเทคโนโลยีการรมควัน ต่อ ปริมาณ BaP ในไส้กรอก frankfurter ที่ผ่านการรมควันจนอุณหภูมิภายในเป็น 70 °C พบว่า การรมควันแบบ home smoke ซึ่งเป็นการรมควันแบบดั้งเดิม มีปริมาณ BaP เกินมาตรฐาน 1 ppb ถึง 12 เท่า ในขณะที่การรมควันแบบสมัยใหม่ที่ใช้ superheated steam smoke chamber มีปริมาณ BaP น้อยที่สุด เนื่องจากในกระบวนการผลิตควันควบคุมปริมาณออกซิเจน และ อุณหภูมิการเผาไหม้ไม้ไม่เกิน 300 – 400 °C ด้วยการฉีดพ่น superheated steam ทำให้ได้ส่วนที่เป็นไอ โดยไม้ไม่มีการสันดาป ปริมาณ BaP ที่ได้จึงต่ำ

อุณหภูมิการเผาไหม้ไม้

นักวิจัยหลายท่าน ได้แก่ Gilbert และ Knowles (1975), Potthast (1982), Girard (1992) รายงานว่า ปริมาณ BaP และ phenols แปรผันตรงกับการเพิ่มอุณหภูมิเผาไหม้ไม้ โดยปริมาณ phenols จะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400-800°C และมีปริมาณที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกิน 800°C ในขณะที่ปริมาณ BaP เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีปริมาณเขม่าและเกิดปฏิกิริยา pyrolysis มากขึ้น ดังนั้นในการผลิตควันเพื่อใช้รมอาหารควรใช้อุณหภูมิเผาไหม้ไม้ช่วง 400-600 °C

อุณหภูมิภายในตู้รมควัน

Daun (1979) กล่าวว่า อุณหภูมิภายในตู้รมควัน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีของผลิตภัณฑ์รมควัน โดยเฉพาะการรมควันร้อน ซึ่งใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการหดตัวของชิ้นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้รมควันยังมีผลต่อการสูญเสียน้ำ การแปลงสภาพของโปรตีน โดยเกิดพันธะเชื่อมข้ามของโมเลกุลโปรตีนที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดเปลือกแข็ง (crust) Simon Rypinski และ Tauber (1966) รายงานว่า อุณหภูมิภายในตู้รมควันที่สูงประมาณ 80 °C มีผลทำให้ phenols ในผลิตภัณฑ์รมควันมีปริมาณมากขึ้น เนื่องจาก อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ phenols ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกระจายตัวในส่วนที่เป็นไขได้ดี แต่อย่างไรก็ตาม Girard (1992) ได้กล่าวไว้ว่า การรมควันแบบร้อนทำให้ผลิตภัณฑ์รมควันมีปริมาณ BaP สูงกว่าการรมควันแบบเย็น สอดคล้องกับ Gilbert และ Knowles (1975) ที่รายงานว่า ปลารมควันที่ผ่านการรมควันแบบร้อนช่วงอุณหภูมิ 80-115°C มีปริมาณ BaP สูงกว่าการรมควันแบบเย็นที่อุณหภูมิไม่เกิน 35°C เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้อัตราการเกาะติด (deposit) ของ PAHs และ BaP ที่ผิวผลิตภัณฑ์มีมากและเร็วกว่า

ชนิดและองค์ประกอบไม้ที่ใช้เป็นแหล่งควัน

Moodie (1970) และ Girard (1992) กล่าวว่า ไม้ที่มีลิกนินในปริมาณสูง เมื่อใช้เป็นแหล่งควัน จะให้ควันที่มีปริมาณ BaP และ PAHs มากกว่าไม้ที่มีลิกนินต่ำ และพบว่า ไม้เนื้อแข็ง เช่น ไม้โอ๊ค มีปริมาณลิกนินน้อยกว่า ไม้เนื้ออ่อน หรือ resinous woods เช่น ไม้สน คือ มี 24 และ 35% ตามลำดับ สอดคล้องกับคำกล่าวของ Guillen, Sopelana และ Partearroyo (2000) ที่ว่า ไม้เนื้อแข็ง เช่น โอ๊ค เชอรี่ บีช เมื่อนำมาใช้เป็นแหล่งควันให้ปริมาณ PAHs น้อยกว่า ไม้เนื้ออ่อน เช่น ไม้สน แต่ Potthast (1982) กล่าวว่า ถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้ไม้ต่ำกว่า 650 °C ชนิดของไม้จะไม่มีผลต่อปริมาณ BaP

ความชื้นของเชื้อเพลิง

Potthast (1980) กล่าวว่า ความชื้นของไม้ที่สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณ BaP ลดลง เนื่องจากใช้ความร้อนในการเผาไหม้ส่วนหนึ่งมาระเหยน้ำเป็นไอ ทำให้อุณหภูมิติดไฟของไม้ต่ำลง ปฏิกิริยา pyrolysis จึงเกิดขึ้นได้น้อย (Randall, 1995) นอกจากนี้ ความชื้นที่สูงขึ้นยังมีผลทำให้ระดับ phenols ในควันลดลง แต่สารประกอบ carbonyls สูงขึ้น ผลิตภัณฑ์รมควันที่ได้จึงมีกลิ่นรสเป็นกรดมากกว่าการรมควันในภาวะปกติ (Girard, 1992)

ปริมาณไขมันในวัตถุดิบ

เนื้อสัตว์ที่มีไขมันสูงกว่า 10% เมื่อนำมาปิ้งย่างจะมี PAHs และ BaP สูงกว่าเนื้อสัตว์ประเภทไขมันในเนื้อต่ำ (Chen,1997) Rhee และ Bratzler (1970) อธิบายว่า BaP มีสมบัติไม่ชอบน้ำ ทำให้แทรกซึม (penetrate) ในส่วนที่เป็นไขมันได้ดี เขาจึงได้ทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณไขมันที่ปลดปล่อยออกจากผลิตภัณฑ์เบคอนขณะทำให้สุก ต่อปริมาณ BaP ในไขมันดังกล่าว โดยทำเบคอนรมควันให้สุกในกระทะไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 150°C แล้ววัดปริมาณไขมันที่ปลดปล่อยออกจากผลิตภัณฑ์พร้อมทั้งวัดปริมาณ BaP ในไขมันดังกล่าวและในเบคอนหลังทำให้สุก พบว่าปริมาณ BaP ในไขมันที่ปลดปล่อยออกมามีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับปริมาณไขมัน และ มีค่ามากกว่าในเนื้อเบคอนหลังทำให้สุก แสดงให้เห็นว่า BaP ละลายอยู่ในส่วนที่เป็นไขมันมากกว่าส่วนที่เป็นโปรตีน ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยของ Simko และคณะ (1993) ที่ศึกษาผลของไขมันในผลิตภัณฑ์ไส้กรอกรมควันชนิด domace ต่อปริมาณ BaP หลังการทำให้สุกโดยการต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 40, 51 และ 62 นาที แล้ววัดปริมาณ BaP ในเนื้อและไขมัน พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการต้ม ปริมาณไขมัน และ BaP ในไส้กรอกลดลง เนื่องจาก BaP มีสมบัติไม่ชอบน้ำ สามารถแทรกซึมในส่วนไขมันได้ดี ดังนั้นเมื่อผลิตภัณฑ์สูญเสียไขมัน ปริมาณ BaP ในไส้กรอกจึงลดลง

บรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ นอกจากมีหน้าที่หลักเพื่อบรรจุ ป้องกันผลิตภัณฑ์ สื่อสารให้ข้อมูล และเพิ่มความสะดวกในการใช้แก่ผู้บริโภคแล้ว บรรจุภัณฑ์ประเภท low density polyethylene (LDPE) ยังสามารถลดปริมาณ PAHs และ BaP ได้เนื่องจากกระบวนการแพร่ (diffusion processes) ของ PAHs เข้าสู่บรรจุภัณฑ์ โดย PAHs จะเคลื่อนย้ายจากตัวกลางที่มีขั้วไปสู่ตัวกลางที่ไม่มีขั้ว (Chen, 1997) Simko และคณะ (1994) ศึกษาผลของการใช้บรรจุภัณฑ์ชนิด LDPE ต่อปริมาณ BaP และ PAHs ใน liquid smoked flavour (LSF) ที่มี BaP เข้มข้น 10.2 ppb และ PAHs อื่นๆ รวมความเข้มข้นทั้งหมด 91.1 ppb โดยนำ LSF บรรจุในขวด LDPE (ชนิด Bralen® RA 2-19 ความหนาแน่น 922 kg/m^3) เก็บที่อุณหภูมิ 24 °C เป็นเวลา 27, 68, 98, 116, 121.5, 141, 145.5 และ 164 ชั่วโมง พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มมากขึ้น ปริมาณ BaP และ PAHs ใน LSF ลดลง ในขณะที่ปริมาณ BaP และ PAHs ในเนื้อ LDPE เพิ่มขึ้น ต่อมา Simko, Simon และ Khunova (1999) บรรจุน้ำกลั่นใน chamber ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน ด้วยแผ่น LDPE ส่วนแรกไม่ใส่น้ำ ส่วนที่สองใส่น้ำที่มี BaP และ PAHs อื่นๆรวมความเข้มข้น 2077 µg/kg แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 24 °C เป็นเวลา 0.75, 1.5, 2.5, 3.5 , 69 และ 143 ชั่วโมง จากนั้นวัดปริมาณ BaP ในแผ่น LDPE และน้ำกลั่น พบว่า เมื่อเวลาการเก็บเพิ่มมากขึ้น ปริมาณ BaP ในน้ำลดลง แต่ในแผ่น LDPE มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจาก BaP

มีความสามารถในการละลาย และ ดูดกลืนบนผิวของ LDPE จากนั้นจึงเกิดการเคลื่อนย้ายเข้าสู่ด้านในของพอลิเมอร์ แต่เมื่อนำ LDPE ที่มี BaP ปนเปื้อนอยู่มา recycle แล้วนำมาบรรจุอาหารประเภทไม่มีขั้ว เช่น น้ำมันพืช หรือ ไส้กรอก อาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของ BaP สู่อาหารได้ โดย Simko และคณะ (1995) กับ Simko และ Khunova (1996) รายงานว่า เมื่อนำ LDPE ที่มี BaP ปนเปื้อนมา recycle แล้วบรรจุอาหารประเภทน้ำมัน จะทำให้ BaP เกิดการแพร่กลับ (rediffusion) จากบรรจุภัณฑ์สู่อาหาร โดยพบความสัมพันธ์ของความเข้มข้น BaP ในน้ำมันเป็นรากที่สองของเวลาที่บรรจุภัณฑ์สัมผัสกับน้ำมัน

ระยะเวลาการเก็บรักษา

Simko (1991) กล่าวว่า การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ปลารมควันเป็นระยะเวลานาน ในบริเวณที่มีแสงและออกซิเจน มีผลทำให้ปริมาณ BaP ที่ผิวของปลามีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก BaP เกิดการสลายตัว (degradation) จากแสง ด้วยกลไก photolytic decomposition และการแพร่ (diffusion) ไปยังชั้นภายในของปลารมควัน

การลดปริมาณเบนโซ(เอ)ไพรีนในอาหารรมควัน

การลดปริมาณ BaP ทำได้หลายวิธีด้วยกันได้แก่ การควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตควัน การดัดแปลงอุปกรณ์รมควัน และ ใช้แผ่นกรอง การใช้ควันเหลว(liquid smoke) และการใช้พอลิเมอร์ชีวภาพในรูปแบบไส้บรรจุ

การควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตควัน

ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการผลิตควัน ที่มีผลต่อปริมาณ BaP คือ อุณหภูมิการเผาไหม้ไม้ชนิดและความชื้นของไม้ที่ใช้เป็นแหล่งควัน อุณหภูมิและเวลาการรมควัน Pearson และ Gillett (1996) รายงานว่า อุณหภูมิการเผาไหม้ไม้ที่สูง ทำให้ปริมาณ BaP มีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาไหม้คือ 300-400°C เนื่องจากควันที่ผลิตได้มีปริมาณ phenols สูง แต่ BaP ต่ำ Guillen, Sopelana และ Partearroyo (2000) กล่าวว่าควันที่ผลิตได้จากไม้เนื้อแข็งมีปริมาณ BaP ต่ำกว่าไม้เนื้ออ่อน และ ความชื้นของไม้ที่เพิ่มขึ้นทำให้ควันมีปริมาณ BaP น้อยกว่าไม้ที่มีความชื้นต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิติดไฟของไม้ต่ำกว่า Gilbert และ Knowles (1975) รายงานว่า การรมควันที่ใช้

อุณหภูมิสูงและเวลาการรมควันที่นาน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณ BaP สูงกว่าการรมควันที่ใช้เวลาสั้นและอุณหภูมิต่ำกว่า

การดัดแปลงอุปกรณ์รมควัน และ การใช้แผ่นกรอง

การดัดแปลงอุปกรณ์รมควัน และ การใช้แผ่นกรอง สามารถลดปริมาณ BaP ได้ เนื่องจากมีการแยกสารประกอบ PAHs ออกจากควันก่อนสัมผัสกับผิวผลิตภัณฑ์ (Gilbert และ Knowles, 1975) Moodie (1970) ศึกษาผลของควันที่ผลิตจากการดัดแปลงอุปกรณ์รมควัน ด้วยวิธี scrubbing โดยการแยกควันที่ผลิตออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกควบแน่นควันที่ไม่ผ่านการ scrubbing เรียกส่วนนี้ว่า unscrubbed condensate (UC) และ ส่วนที่สอง ผ่านควันที่ผลิตได้เข้า scrubbing chamber (SC)ที่มีการพ่นน้ำ แล้วนำทั้งสองส่วนวัดปริมาณ BaP พบว่าส่วนของ SC มี BaP น้อยกว่าส่วน UC นอกจากการดัดแปลงอุปกรณ์รมควันโดยวิธีดังกล่าวแล้ว การใช้แผ่นกรอง สามารถลด BaP ได้เช่นกัน โดย Steinig และ Schreiber (1977) ศึกษาการใช้แผ่นกรองที่ทำจากใยแก้ว (glass fiber) หรือเหล็กกล้า (steel wool) กรองควันในอุปกรณ์รมควันประเภท Altona® type smoking unit เพื่อรมควันปลา herring และ schillerlocken พบว่าลดปริมาณ BaP ได้ทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Gilbert และ Knowles (1975) และ Thorsteinsson (1969) ที่ว่า การกรองควันผ่านตัวกรองที่เป็น cotton wool หรือ steel wool สามารถลด PAHs ในอาหารรมควันได้

ควันเหลว (liquid smoke)

ควันเหลวที่ผลิตในระบบอุตสาหกรรม เมื่อนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์รมควันจะให้ผลิตภัณฑ์คุณภาพดี และ มีปริมาณ BaP น้อย เนื่องจากในกระบวนการผลิตควันเหลว จะผ่านควันที่ได้จากการเผาไหม้ให้สัมผัสกับน้ำในลักษณะสวนทาง (countercurrent) และมีการหมุนเวียนควันจนมีปริมาณสารที่ต้องการในน้ำในระดับที่เพียงพอ แล้วปล่อยให้ส่วนที่เป็นเขม่าและสารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยา polymerization ตกตะกอน ของเหลวที่ได้กรองผ่านเยื่อเซลลูโลสเพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการโดยเฉพาะ BaP ออก ทำให้ควันเหลวที่ได้มีปริมาณของ ฟีนอล กรดอินทรีย์ และ สารประกอบคาร์บอนิลในระดับที่ต้องการ (Pearson และ Gillett, 1996) Underwood, Graham และ Robert (1991) ผลิตควันเหลว ด้วยวิธี fast pyrolysis โดยการเผาไหม้ไม้ที่อุณหภูมิ 400-650 °C เป็นเวลา 0.3 - 2 วินาที แล้วลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 350 °C ภายใน 0.6 วินาที ควันที่ได้นำมาผ่านน้ำ จากนั้นแยกส่วนที่เป็นอนุภาคออก นำของเหลวที่ได้มาวัดปริมาณ BaP พบว่ามีน้อยกว่า 1 ppb ขณะที่สารประกอบคาร์บอนิล ยังมีอยู่ในปริมาณเพียงพอสำหรับการเกิดสีน้ำตาล Underwood, Gary และ Jeffrey (1998) ผลิตควันเหลวด้วยการนำองค์ประกอบของเหลวจาก pyrolysis แบบช้า ซึ่งใช้เวลาใน

การเผาไหม้นาน และ แบบเร็ว ซึ่งใช้เวลาในการเผาไหม้น้อยและลดอุณหภูมิการเผาไหม้ลงอย่างรวดเร็ว มาผ่าน resins ที่ทำจาก divinyl benzene styrene copolymer ที่มีรูพรุนขนาด 50-500 A° ในอัตราส่วน 35-50 ml ต่อ resin 1 g พบว่าวิธีนี้ไม่มีผลต่อปริมาณสาร phenol แต่ลด BaP ได้ต่ำกว่า 1 ppb เนื่องจาก resin มีสมบัติ nonpolar และไม่ชอบน้ำ จึงแยก BaP จากของเหลวได้ วิธีใช้ควันเหลวในอาหารรมควันทำได้หลายวิธี เช่น จุ่ม ฉีดพ่น หรือ ฉีดควันเหลวผ่านหัวฉีดภายใต้ความดัน (atomizing) เป็นต้น (Hoenderken และคณะ, 1994; Pearson และ Gillett, 1996)

การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพในรูปแบบไส้บรรจุ

การใช้พอลิเมอร์ชีวภาพในรูปแบบไส้บรรจุ (casing) สามารถลดปริมาณ BaP ได้ ดังรายงานของ Gilbert และ Knowles (1975) ที่ว่าผลิตภัณฑ์รมควัน ที่หุ้มด้วย cellulose หรือไส้บรรจุสังเคราะห์ยอมให้ BaP และ PAHs ซึมผ่านได้เพียง 30 % เนื่องจากมีสมบัติชอบน้ำ จึงป้องกัน BaP ได้ ขณะที่การหุ้มด้วยไส้ธรรมชาติ เช่น ไส้แกะ หรือ ไส้หมู จะป้องกันได้น้อยกว่า เพราะมีโปรตีน และ ไขมันที่ยอมให้ BaP และสารประกอบที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำแทรกซึมเข้าไปได้ Roda และคณะ (1999) รายงานว่า ไส้บรรจุชนิด collagen กับไส้บรรจุ cellulose ที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ frankfurter รมควัน ช่วยลดปริมาณ BaP ได้ โดยผลิตภัณฑ์ในไส้บรรจุมีปริมาณ BaP ที่ผิวน้อยที่สุด สอดคล้องกับการทดลองของ Fedonin และคณะ (1975) ที่วัดปริมาณ BaP ใน Armavirsk salami รมควันที่บรรจุในไส้ธรรมชาติ ไส้สังเคราะห์จากโปรตีน และ ไส้ cellulose ได้ 4-4.5, 0.8-1.2, 0.3-0.5 ppb ตามลำดับ และ การทดลองของ Simon และคณะ (1969) ที่วัดปริมาณ BaP ใน frankfurter รมควัน ที่บรรจุในไส้ cellulose และ ไส้ธรรมชาติจากแกะ ได้ 1.6 และ 13 ppb ตามลำดับ จะเห็นว่า ไส้ cellulose ลดปริมาณ BaP ในผลิตภัณฑ์รมควันได้มากที่สุด Rhee และ Bratzler (1970) อธิบายว่า cellulose มีโครงสร้างเป็นผลึกที่มีสมบัติชอบน้ำ เมื่อดูดกลืนน้ำจะบวมและอุ้มน้ำไว้ภายใน ส่งผลให้ BaP ซึ่งไม่ชอบน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึมผ่านได้น้อย และพบว่า cellulose ไม่มีผลในทางลบต่อกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ และ ตัวไส้ไม่มี BaP Simon และคณะ (1969) ทดลองนำไส้ cellulose ใส่ลงในตัวทำละลายเฮกเซนที่มี BaP เข้มข้น 0.01 mg/ml ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นวัดปริมาณ BaP ที่ไส้บรรจุ แต่ไม่พบ เขาอธิบายว่า อาจเนื่องจาก BaP ไม่สามารถเคลื่อนย้ายผ่านเยื่อผนังของ cellulose ได้

ผลของการรมควันต่อลักษณะ และ คุณภาพของผลิตภัณฑ์

การรมควันมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้าน สี กลิ่นรส ลักษณะเนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

การเปลี่ยนแปลงด้านสี

ผลิตภัณฑ์รมควัน ส่วนใหญ่มีผิวด้านนอกเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากปฏิกิริยา Maillard ของหมู่อะมิโนอิสระจากโปรตีน กับ สารประกอบคาร์บอนิลจากควัน (Ruiter, 1979) Pigott และ Tucker (1990) รายงานว่า การเกิดสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์รมควันเป็นปฏิกิริยาแบบ nonenzymatic browning ที่เรียกว่า Maillard reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบคาร์บอนิลในควัน เช่น อัลดีไฮด์ และ คีโตน ทำปฏิกิริยากับสารประกอบเอมีน กรดอะมิโน และ โปรตีน เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำตาล อาทิ furfural, hydroxymethyl furfural และอนุพันธ์ของ furfural

การเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่นรส

กลิ่นรสในอาหารรมควัน เกิดจาก สารประกอบ phenol ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ guaiacol, 4-methylguaiacol, 2,6-dimethoxyphenol และ phenol ซึ่งถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้า และ แทรกซึมเข้าไปภายในผลิตภัณฑ์ โดยพบปริมาณสารดังกล่าวที่บริเวณผิวมากกว่าในเนื้อผลิตภัณฑ์ (Daun, 1979)

การเปลี่ยนแปลงด้านเนื้อสัมผัส

การรมควัน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการสูญเสียน้ำ และ การแปลงสภาพของโปรตีนในเนื้อเยื่อโครงสร้างและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ระหว่างการรมควันเกิดพันธะเชื่อมข้ามของโมเลกุลโปรตีนที่ผิวหน้าผลิตภัณฑ์ ทำให้ผิวนอกแข็งแน่น และ เกิดเปลือกแข็ง ซึ่งถ้าปฏิกิริยานี้เกิดมากเกินไปจะทำให้ผิวนอกมีลักษณะเป็นชั้นแข็ง และ ขัดขวางการซึมเข้าของควันสู่ภายในผลิตภัณฑ์ และ การระเหยของน้ำออกจากภายใน ทำให้เนื้อในผลิตภัณฑ์นิ่มและ (Daun, 1979)

การเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางโภชนาการ

ผลิตภัณฑ์รมควัน ส่วนใหญ่เกิดการสูญเสีย วิตามินบี โดยเฉพาะ thiamine และกรดอะมิโน เช่น lysine ปริมาณที่สูญเสียขึ้นอยู่กับ เวลา และ อุณหภูมิในการรมควัน พบการสูญเสีย lysine ที่บริเวณผิวมากกว่ากึ่งกลางของผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก lysine ทำปฏิกิริยากับสารประกอบ carbonyls ให้สีน้ำตาลที่ผิวของผลิตภัณฑ์ (Daun, 1979) Opstvedt (1988) รายงานว่า ควันประกอบด้วยสารประกอบ carbonyls ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับกรดอะมิโน lysine ส่งผลให้คุณภาพโปรตีนของผลิตภัณฑ์รมควันลดลง โดยการรมควันที่อุณหภูมิ 95 – 100°C จะทำให้โปรตีนเสื่อมคุณภาพมากที่สุด นอกจากนั้น ระยะเวลา และ ความเข้มข้นของควันที่เพิ่มขึ้นก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้คุณภาพโปรตีนในผลิตภัณฑ์รมควันลดลงเช่นกัน

พอลิเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ชีวภาพ เป็นสารที่สังเคราะห์ได้จากสิ่งมีชีวิต แบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่ polysaccharides โปรตีน และ polynucleic acid (Alger, 1989) พอลิเมอร์ชีวภาพรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร คือ ฟิล์มหรือสารเคลือบบริโภคได้ ซึ่งนอกจากเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดปริมาณการใช้บรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกแล้วยังมีบทบาทในการชะลอการซึมผ่านของก๊าซ ไอน้ำและสารให้กลิ่นรส และ เสริมลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะมันเงา (Krochta และ Mulder-Johnston, 1997)

polysaccharides เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาว ละลาย และ กระจายตัวในน้ำ ช่วยปรับปรุงคุณภาพอาหารด้านความแข็ง (hardness) ความกรอบ (crispness) ความอัดแน่น (compactness) การเกิดเจล (gelation) และ ความรู้สึกภายในปาก (Whistler และ Daniel, 1990) polysaccharides ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง เพคติน กัมชนิดต่างๆ (Nisperos-Carriedo, 1994) ซึ่งองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (FDA, 1991) จัด polysaccharides เป็นวัตถุเจือปนในอาหารและได้รับเครื่องหมาย GRAS (generally regarded as safe) Nisperos-Carriedo (1994) กล่าวว่า การใช้สารเคลือบจาก polysaccharides ในอาหารทอด ช่วยลดการดูดกลืนน้ำมันระหว่างทอด เนื่องจากการเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนั้น ฟิล์มเคลือบจาก polysaccharides ยังช่วยป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการขนส่ง การเก็บรักษา และ ป้องกันการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ Debeaufort, Jesus-Alberto และ Voilley (1998) รายงานว่า มีการใช้คาราจีแนนเคลือบผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ไก่ และ ปลาแช่เยือกแข็ง เพื่อลดการสูญเสียความชื้นบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ Murray

และ Luft (1973) กล่าวว่า การเคลือบชิ้นแอปเปิ้ลที่ปอกเปลือกด้วยสารละลาย 15 DE starch hydrolysate เข้มข้น 40 % โดยน้ำหนัก มีผลช่วยลดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เคลือบ Jokay, Nelson และ Pawell (1967) ผลิตสารเคลือบบริโภคได้จาก hydroxypropylated amylomaize starch 70 % และ กลีเซอรอล 12 % โดยน้ำหนัก เคลือบบนผิวของแอลมอนด์ ผู้ทดลองพบว่ามีผลในการป้องกันการเกิดกลิ่นหืนได้ดีกว่าตัวอย่างที่ไม่เคลือบ เนื่องจาก สารเคลือบที่ผลิตได้มีอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

โปรตีน นอกจากเป็นสารอาหารที่สำคัญแล้ว ยังมีสมบัติด้านหน้าที่ (functional properties) ที่ดี เช่น ช่วยให้เกิดเจล ฟอง ให้กลิ่นรส และ เนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์อาหาร (Kinsella, 1984) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ฟิล์มหรือสารเคลือบจากโปรตีน ควรคำนึงถึงคุณค่าทางอาหาร และคุณภาพของโปรตีนที่อาจเปลี่ยนแปลงในระหว่างการผลิตด้วย (Gennadios และคณะ,1994) โปรตีนที่ใช้ในการผลิตฟิล์มหรือสารเคลือบ ได้แก่ คอลลาเจน เจลาติน โปรตีนข้าวโพด กลูเตนข้าวสาลี โปรตีนถั่วเหลือง และ เคซีน (Krochta และ Mulder-Johnston, 1997) ฟิล์มจากโปรตีนสามารถกันการซึมผ่านของออกซิเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีในที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ แต่ในที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ฟิล์มไม่สามารถกันการซึมผ่านของก๊าซได้ เนื่องจาก ฟิล์มมีสมบัติชอบน้ำ ทำให้เกิดการดูดซับความชื้น (Donhowe และ Fennema, 1994)

Gennadios และคณะ (1994) รายงานว่า มีการใช้สารเคลือบบริโภคได้จากโปรตีนในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ เพื่อลดการสูญเสียความชื้น ปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ รักษากลิ่นรส ความนุ่มตามธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ และ ป้องกันการดูดกลืนน้ำมันในระหว่างทอด

สมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดที่ใช้ในงานวิจัย

พอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ hydroxypropylmethyl cellulose, methyl cellulose และ hydroxypropyl cellulose โดยพอลิเมอร์เหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มของ cellulose ethers ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีสมบัติชอบน้ำ และ อุ้มน้ำดี (Luner และ Oh, 2001) สารเคลือบหรือฟิล์มที่ผลิตได้จากวัสดุชนิดนี้จึงมีสมบัติชะลอการซึมผ่านของไอน้ำในระดับปานกลาง แต่ ป้องกันการดูดกลืนน้ำมันและไขมันได้ดี มีความคล่องตัว โปร่งแสง ไม่มีสี และ กลิ่นรส (Guilbert และBiquet, 1996; Krochta และ Mulder- Johnston, 1997) ในการผลิต cellulose ethers จะนำเซลลูโลส ทำปฏิกิริยากับ alkaline hydroxides เช่น lithium hydroxide หรือ potassium hydroxide ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำมาทำปฏิกิริยากับ alkylhalide เช่น methyl chloride หรือ ethyl chloride cellulose ethers มีที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง และ ทางการแพทย์ เช่น เป็นสารให้ความหนืดในอาหาร เคลือบเม็ดยา หรือ เป็นสารให้ความคงตัวในครีมหรือโลชั่น เป็นต้น (David และ Hon, 1996)

hydroxypropylmethyl cellulose (HPMC)

Zecher และ Gerrish (1992) กับ Nisperos-Carriedo (1994) กล่าวว่า HPMC เป็น cellulose ether ที่ไม่มีประจุ มีสมบัติละลายน้ำ และ ขึ้นรูปฟิล์มได้ดี ผลิตโดย การทำให้เซลลูโลส เป็นด่าง จากการแช่ในสารละลายด่าง จากนั้นทำปฏิกิริยากับ methyl chloride และ propylene oxide ในโมเลกุลของเซลลูโลส ประกอบด้วยหน่วย D-glucopyranosyl ซึ่งแต่ละหน่วยมีหมู่ hydroxyl ที่เกิดการแทนที่ได้ 3 หมู่ คือที่คาร์บอนตำแหน่ง 2, 3 และ 6 ซึ่งความมากน้อยแสดงด้วยค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) โดยทั่วไป HPMC มีค่า DS ของ methoxyl 1-2.3 และ molar substitution (MS) ของ hydroxypropyl 0.05-1 Coffey, Bell และ Henderson (1995) รายงานว่า HPMC ละลายน้ำได้และเกิดเจลเมื่อให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50-85°C เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นสะเทือน และ เคลื่อนไหว มากกว่าพลังงานพันธะไฮโดรเจนของน้ำที่ล้อมรอบพอลิเมอร์ โมเลกุลน้ำจึงแยกตัวออกจากสายพอลิเมอร์ ทำให้ส่วนที่ไม่ชอบน้ำของพอลิเมอร์หันเข้าหาและจับกัน เกิดเป็นโครงร่าง 3 มิติของเจล การเติมหมู่ hydroxypropyl ในโมเลกุลของ methyl cellulose ทำให้เจลที่ได้มีความแข็งน้อยลง เนื่องจากหมู่ hydroxypropyl มีความชอบน้ำมากกว่าหมู่ methyl ดังนั้น เมื่อให้ความร้อนจึงจับน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากกว่า

ปัจจุบันนิยมใช้ HPMC อย่างแพร่หลาย เพราะนอกจากเป็นสารให้ความหนืดแล้วยังช่วยปรับปรุงลักษณะปรากฏ ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ และ เกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน (Krumel และ Lindsay, 1976; Coffey และคณะ, 1995) Dziezak (1991) รายงานว่า HPMC เป็นกัมชนิดหนึ่งที่เกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน จึงเหมาะสำหรับอาหารทอด เพราะช่วยลดการดูดกลืนน้ำมัน และ ช่วยเพิ่มการยึดเกาะ (adhesion) ของแป้งชุบทอดกับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังช่วยกักเก็บแก๊สในผลิตภัณฑ์ขนมอบระหว่างอบ Balasubramaniam และคณะ (1997) พบว่าการใช้ HPMC เคลือบลูกชิ้นไก่ทอดสามารถลดการดูดกลืนน้ำมันบริเวณเนื้อในได้ 33.7% Kamper และ Fennema (1985) กล่าวว่าการใช้ฟิล์มที่ประกอบด้วย HPMC และ ไขมัน เช่น paraffin หรือ beeswax ช่วยลดการซึมผ่านของไอน้ำได้มากกว่า LDPE และ ช่วยชะลอการซึมผ่านของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงสู่ผลิตภัณฑ์ความชื้นต่ำที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุเดียวกัน

methyl cellulose (MC)

MC เป็น cellulose ether ที่ไม่มีประจุ ผลิตโดย แช่เซลลูโลสในสารละลายด่าง จากนั้นทำปฏิกิริยากับ methyl chloride ที่อุณหภูมิ 50-100°C ความดัน 14 kg/cm^2 (Zecher และ Gerrish, 1992) MC ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มีลักษณะเป็นผงสีขาว ต้านทานจุลินทรีย์ได้ดี และ มีค่า DS 1.64-1.92 (Donhowe และ Fennema, 1993) เมื่อละลายน้ำให้สารละลายใส และ เป็นเจลเมื่อได้

รับความร้อน เนื่องจากเมื่อสารละลายได้รับความร้อน โมเลกุลน้ำบริเวณใกล้หมู่ไม่ชอบน้ำของ MC แยกตัวออก ส่งผลให้เกิดการรวมตัวกันเป็นเจลที่มีโครงสร้าง 3 มิติ (Donhowe และ Fennema, 1993) ความแข็งแรงของเจลที่ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่ methyl และน้ำหนักโมเลกุล โดยปริมาณของหมู่ methyl ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้เจลที่ได้มีความแน่น และ เจลมีความแน่นสูงสุดเมื่อมีน้ำหนักโมเลกุล (M_n) 40,000 (Coffey และคณะ, 1995) แม้ MC ผงจะมีสมบัติต้านทานจุลินทรีย์ได้ดีแต่ถ้าเก็บสารละลายเป็นเวลานานต้องใส่วัตถุกันเสียด้วย (Zecher และ Gerrish, 1992)

ในอุตสาหกรรมอาหารมีการใช้ MC อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติเป็นสารให้ความหนืด เกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน และ ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มและสารเคลือบได้ (David และ Hon, 1996) นอกจากนั้น ผลิตภัณฑ์อาหารทะเล และ มันฝรั่งทอดยังใช้ MC ในการลดการดูดกลืนน้ำมัน เนื่องจากมีสมบัติต้านน้ำมัน และ เป็นเจลเมื่อได้รับความร้อน (Zecher และ Gerrish, 1992; BeMiller และ Whistler, 1996) Nelson และ Fennema (1991) ศึกษา ผลการใช้ฟิล์มจาก MC ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต พบว่า ช่วยลดการเคลื่อนย้ายของไขมัน และ ป้องกันการเกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการได้ดี Hodge และ Osman (1976) รายงานว่า มีการใช้ MC ช่วยเพิ่มความหนืดของแป้งผสม และ ช่วยการเกิดเจลระหว่างอบในผลิตภัณฑ์ขนมอบ Zecher และ Gerrish (1992) กล่าวว่า สารละลาย MC 0.1 % ช่วยลดแรงตึงผิว (surface tension) ของน้ำจาก 720 μN/cm เป็น 450 – 550 μN/cm ที่อุณหภูมิ 20 °C จึงนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ซอสประเภทอิมัลชั่นและครีม เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางด้านการอุ้มน้ำ

hydroxypropyl cellulose (HPC)

HPC เป็น cellulose ether ที่ไม่มีประจุ ผลิตจากปฏิกิริยาระหว่าง เซลลูโลส กับ สารละลายด่าง เช่น NaOH จากนั้นผ่านกระบวนการ alkoxylation ด้วย propylene oxide ที่อุณหภูมิ 70-100°C 5-10 ชั่วโมง HPC ที่ได้เป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่นรส มีความต้านทานจุลินทรีย์สูง จากการทดสอบทางพิษวิทยาพบว่า HPC ไม่มีพิษต่อร่างกาย (Zecher และ Gerrish, 1992; Winnik, 1995) HPC มีลักษณะโครงสร้างเป็นโมเลกุลแบบแท่ง (Tanaka, Omada และ Nitta, 2000) ละลายได้ในน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เมทานอล เอทานอล และมีสมบัติที่สำคัญ คือ มีความชอบน้ำ และ thermoplastic มีสมบัติที่ต่างจาก MC และ HPMC คือ ไม่เกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน และตกตะกอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 45 °C (Coffey และคณะ, 1995) ในการละลาย HPC ควรทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อน โดยอาจใช้เครื่องกวน หรือเครื่องผสมที่มีระบบสั่น (vortex) กวนสารละลายตลอดเวลา (Zecher และ Gerrish,1992) Krumel และ Lindsay (1976) รายงานสมบัติความชอบน้ำของ HPC ด้วยค่า equilibrium moisture content ว่า มีค่าต่ำกว่า HPMC และ MC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chinnan และ Park (1995) ที่สรุปว่า

ฟิล์มจาก HPC มีค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability) น้อยกว่า MC แต่ มีความคล่องตัวมากกว่า เนื่องจาก HPC เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายยาว และ เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุล

Zecher และ Gerrish (1992) รายงานว่า มีการใช้ HPC ในอุตสาหกรรมกระดาษ อาหาร และ ยา โดยฟิล์มที่ได้จาก HPC มีสมบัติปิดผนึกด้วยความร้อนได้ กันการซึมผ่านของไขมัน และน้ำมันได้ดี มีการใช้ HPC เป็นสารเพิ่มความคงตัว และ ช่วยให้เกิดฟองในผลิตภัณฑ์ whipped topping (Klug, 1970) นอกจากนี้ HPC ยังสามารถใช้ร่วมกับสารเคลือบอื่นๆ เช่น shellac, ethylcellulose และ แป้ง เพื่อปรับปรุงความเหนียว และ ลดแนวโน้มการฉีกขาดของฟิล์มได้ (Zecher และ Gerrish, 1992) Krumel และ Lindsay (1976) กล่าวว่า ฟิล์ม HPC ใช้เคลือบถั่ว และลูกอมเพื่อลดการเสื่อมเสียและดูดซับความชื้นของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้มีการใช้ HPC ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง โดยเป็นส่วนผสมของ เครื่องสำอางจัดแต่งทรงผม น้ำหอม และโคโลญจน์ที่มีแอลกอฮอล์เป็นส่วนผสม (David และ Hon, 1996)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย