เมื่อพิจารณาปัจจัยโดยรวมในการสกัดระหว่างระดับอุณหภูมิและระยะเวลา พบว่า มีอันตรกริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการสกัดต่อค่าปริมาณแอนโธไซยานิน ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ค่าสี ปริมาณเมล็ดถั่วดำที่ดี ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ อุณหภูมิ และระยะเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณแอนโธไซยานินและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเมล็ดถั่วดำที่ดี มีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพของส่งทดลองทั้งหมดให้ค่าเฉลี่ยดังนี้ (ตารางที่ 20) ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 7.14-6.68 ปริมาณแอนโธไซยานินในช่วง 4.31-32.20 มิลลิกรัม / 100 กรัมถั่วดำ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในช่วงร้อยละ 0.270-1.576

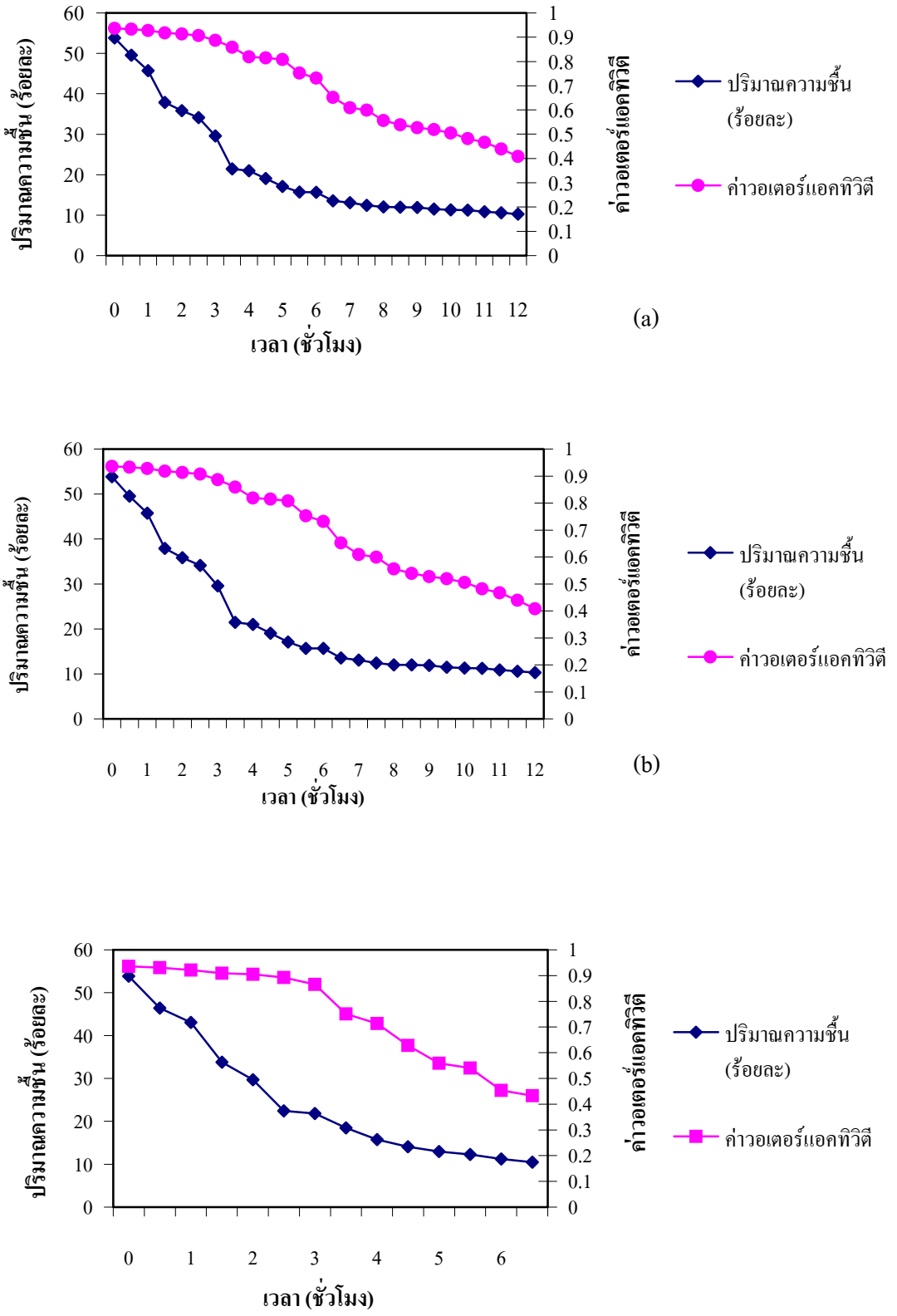
ค่าสี L* แสดงค่าความสว่างในช่วง 6.07-67.50, C* แสดงค่าความเข้มของสีในช่วง 20.69-50.80 และ h แสดงค่ามุมของสี ในช่วง 29.63-73.53 องศา ซึ่งให้ค่าสีน้ำตาลแดงถึงน้ำตาลส้ม โดยมีปริมาณเมล็ดถั่วดำที่ดีในช่วงร้อยละ 56.55-67.64 และ ปริมาณเมล็ดถั่วดำที่แตกและเกิดยางในช่วงร้อยละ 32.26-43.45 ซึ่งสิ่งทดลองที่ให้ปริมาณแอนโธไซยานินและปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดสูงที่สุด คือ สิ่งทดลองที่ใช้อุณหภูมิที่ระดับ 60 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการสกัด 50 นาที

การคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสีจากเมล็ดถั่วดำ จะพิจารณาจากปริมาณแอนโธไซยานินและปริมาณเมล็ดถั่วที่มีคุณภาพดีเป็นสำคัญ คือ มากกว่าร้อยละ 55 โดยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสีจากเมล็ดถั่วดำ คือ สกัดสารสีด้วยน้ำกลั่นสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง อัตราส่วนของเมล็ดถั่วดำต่อน้ำที่ใช้ คือ 1:4 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที ซึ่งให้ปริมาณแอนโธไซยานิน เท่ากับ 32.20 มิลลิกรัม / 100 กรัมถั่วดำ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ร้อยละ 1.576 และค่าสี L*, C*, h เท่ากับ 6.07, 20.69, 29.63 องศา ตามลำดับ (ตารางที่ 20) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ การทดลองของ Kalt *et al*. (2000) ซึ่งรายงานว่าการสกัดสารแอนโธไซยานินจาก Lowbush Blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสารแอนโธไซยานินได้ปริมาณสูงกว่าการสกัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิสูง ช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายของสารแอนโธไซยานินออกจากเนื้อเยื่อที่ผิวของผล Lowbush Blueberry ทำให้มีปริมาณของสารแอนโธไซยานินที่สกัดได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น และสอดคล้องกับรายงานของ Bronner and Beecher (1995) ซึ่งพบว่าสารนารินจิน (naringin) ซึ่งเป็นสารฟลาวโวนอยด์ที่พบในน้ำองุ่นสามารถถูกสกัดออกมาด้วยปริมาณมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดให้สูงขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Kahtani and Hassan

(1990) ที่ศึกษาการทำแห้งแบบพ่นฝอยสารละลายที่สกัดจากดอกกระเจี๊ยบแดงโดยกระบวนการสกัดดอกกระเจี๊ยบแดงด้วยน้ำ โดยใช้วิธีผสมระหว่างการแช่และการสกัดแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 10 และ 30 นาทีตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของดอกกระเจี๊ยบแดงแห้งต่อน้ำเท่ากับ 1:10 (w/v) นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ นัยวิท (2538) ซึ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตและการใช้สีแดงธรรมชาติจากดอกกระเจี๊ยบแดงโดยศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดแอนโธไซยานินจากดอกกระเจี๊ยบแดงแห้ง พบว่ากระบวนการสกัดแอนโธไซยานินจากดอกกระเจี๊ยบแดงแห้งที่เหมาะสม คือ การสกัดด้วยน้ำ ด้วยอัตราส่วนในการสกัดเท่ากับ 1:10 (w/v) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสกัด 80 นาที มีสภาวะใกล้เคียงและสอดคล้องกับการศึกษาคุณสมบัติการคืนตัวของผงแห้งจากดอกกระเจี๊ยบแดงของ Kareem and Brennan (1975) ที่ใช้กระบวนการสกัดด้วยการแช่ดอกกระเจี๊ยบแดงแห้งในอัตราส่วนของดอกกระเจี๊ยบแดงแห้งต่อน้ำเท่ากับ 1:10 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และให้ความร้อนแก่สารละลายให้มีอุณหภูมิประมาณ 66 องศาเซลเซียส นานประมาณ 60 นาที ได้สารสกัดที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 7

4. การศึกษาอุณหภูมิในการอบแห้งเมล็ดถั่วดำ

ศึกษาอัตราการทำแห้งของเมล็ดถั่วดำที่ได้จากการสกัดแอนโธไซยานินด้วยตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิลมร้อน 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบแห้งแบบถาด วัดค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของตัวอย่างทุกๆ 30 นาที ได้กราฟแสดงอัตราการทำแห้ง (drying curve) และกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าวอเตอร์แอคทิวิตี แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 กราฟอัตราการทำแห้งเมล็ดถั่วดำด้วยตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส (a), 55 องศาเซลเซียส (b), และ 60 องศาเซลเซียส (c)

จากผลการศึกษาพบว่า ระยะเวลาในการทำแห้งที่ทำให้ได้เมล็ดถั่วดำให้มีปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 10-15 และมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีไม่เกิน 0.5 (สมชาติ, 2540) เนื่องจาก อาหารประเภทถั่วเมล็ดแห้ง ซึ่งเป็นแหล่งอาหารโปรตีนที่สำคัญมักมีปัญหาจากเชื้อรา ดังนั้น วิธีป้องกันที่ดีที่สุด คือ ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ มิให้เชื้อราเจริญ และพบว่า เชื้อราที่ซึ่งชอบเจริญสภาวะที่แห้งสามารถเจริญได้ที่มี ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีขั้นต่ำ 0.65 (สุมณฑา, 2545) จากการทดลองทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 12 ชั่วโมง (ความชื้นร้อยละ 10.27, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี 0.408) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 8 ชั่วโมง(ความชื้นร้อยละ 10.42, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี 0.43) และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6 ชั่วโมง 30 นาที (ความชื้นร้อยละ 10.46, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี 0.433) โดยร้อยละของปริมาณเมล็ดถั่วดำที่ดี ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ คือ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่าเฉลี่ยของผลผลิตเท่ากับ ร้อยละ 57.63, 57.32 และ 56.89 ตามลำดับ

พิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพของสิ่งทดลองทั้งหมดให้ผลดังนี้ (ตารางที่ 21) จำนวนเมล็ดดีร้อยละ 56.89-57.63, ค่าสี L* แสดงค่าความสว่าง 13.93-15.39, C* แสดงค่าความเข้มของสี 0.97-1.07, h แสดงค่ามุมของสี ในช่วง 25.89-28.09 องศา

เมื่อพิจารณาความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ การทำแห้งเมล็ดถั่วดำที่อุณหภูมิ 50 และ 55 ใช้เวลานานกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยที่ร้อยละของปริมาณเมล็ดถั่วดำที่ดีไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงเลือกสภาวะการทำแห้งเมล็ดถั่วดำที่เหลือจากการสกัดแอนโธไซยานินด้วยตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งมีปริมาณเมล็ดถั่วดำที่ดีคิดเป็นร้อยละ 56.89 และค่าสี L*, C* และ h เท่ากับ 15.39, 0.97 และ 27.81 องศา ตามลำดับ (ภาพที่ 6)

ตารางที่ 21 จำนวนเมล็ดดีและค่าสี ของเมล็ดถั่วดำที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเมล็ดดี^{ns} (ร้อยละ)	ค่าสี				
		L*	a*^{ns}	b*^{ns}	C*^{ns}	h (องศา)^{ns}
50	57.63	13.93b	0.87	0.43	1.00	25.89
55	57.32	14.44b	0.72	0.39	1.07	28.09
60	56.89	15.39a	0.88	0.37	0.97	27.81

หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกัน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่อยู่ในแนวตั้ง เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ภาพที่ 6 เมล็ดถั่วดำที่ดี (ซ้าย) และเมล็ดถั่วดำที่แตกและเกิดยาง (ขวา) ที่ผ่านการทำแห้งด้วยตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 30 นาที

5. การศึกษาการทำสารสีเข้มข้น

ศึกษาวิธีการทำเข้มข้นสารสี โดยเปรียบเทียบการระเหยแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิระดับ 50, 55, 60 องศาเซลเซียส และวิธีการระเหยแบบระบบเปิดโดยการระเหยด้วยน้ำเดือดโดยใช้หม้อแสตนเลสอังในอ่าง ควบคุมอุณหภูมิที่ระดับ 87±2 องศาเซลเซียส ระเหยสารละลายสีจนปริมาณของแข็งที่ละลายได้สุดท้ายเท่ากับ 5 บริกซ์ พบว่า วิธีการทำเข้มข้นสารสีทั้ง 4 วิธีมีผลทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยการระเหยที่อุณหภูมิ 50 และ 55 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณแอนโธไซยานินสูงที่สุดและไม่แตกต่างกัน และให้ปริมาณแอนโธไซยานินสูงกว่าที่ 60 องศาเซลเซียส และระบบเปิดที่ 87 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 22) เนื่องจากการระเหยที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยแบบระบบปิดทำให้สารสกัดสัมผัสกับออกซิเจนได้น้อยอีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยต่ำ ทำให้สารสกัดที่ได้มีปริมาณแอนโธไซยานินสูงกว่าการระเหยที่อุณหภูมิ 87 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 22 ผลของอุณหภูมิในการระเหยน้ำออกต่อปริมาณแอนโธไซยานินและค่าสีในการทำสารสีเข้มข้น

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)	ปริมาณแอนโธไซยานิน (มก./100 มล.)	ค่าสี					
			L*	a*	b*	C*	h (องศา)	ΔE^*
control		11.49±0.13	6.07	17.97	11.24	20.69	29.63	0.00
50	135a	32.57±0.16a	0.14a	0.33a	0.08a	0.35a	13.37a	21.69
55	86b	32.07±0.27a	0.14a	0.34a	0.08a	0.35a	13.27a	21.69
60	66c	31.13±0.33b	0.11b	0.18b	0.04b	0.18b	13.01b	21.85
87±2	25d	29.83±0.32c	0.10c	0.08c	0.02c	0.08c	13.10b	21.94

หมายเหตุ a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกันที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

control = สารละลายก่อนระเหย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทำเข้มข้นสารสีทั้ง 4 วิธี มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการระเหยน้ำออกจะช่วยลดเวลาในการทำเข้มข้นสารสี การ

ระเหยแบบระบบเปิดที่อุณหภูมิ 87±2 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการระเหยเร็วที่สุด คือ 25 นาที ในขณะที่การระเหยแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 55, 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการระเหยนานคือ 135, 86 และ 66 นาที ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าสี L*, C* และ h และค่า ΔE* พบว่า สารสีทั้ง 4 สิ่งทดลองมีสีน้ำตาลแดงไม่แตกต่างกัน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความสว่าง L*, C* มีแนวโน้มลดลง ค่าความสว่าง L* มีค่าอยู่ในช่วง 0.10-0.14 , ค่าความเข้มของสี C* มีค่าอยู่ในช่วง 0.08-0.35 และค่ามุมของสี h มีค่าอยู่ในช่วง 13.01-13.37 องศา ซึ่งแสดงค่าสีน้ำตาลแดง ค่าความแตกต่างของสี ΔE* (color difference) หมายถึง ความแตกต่างทั้งหมดของสี ซึ่งในการทดลองเปรียบเทียบกับ ค่าสีของสารสีเข้มข้น กับค่าสีของสารละลายก่อนระเหย (ตารางที่ 22) โดยสารสีเข้มข้นที่ระเหยแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50, 55, 60 องศาเซลเซียสและการระเหยแบบระบบเปิดที่อุณหภูมิ 87±2 องศาเซลเซียส มีค่าความแตกต่างของสี ΔE* เท่ากับ 21.69, 21.69, 21.85 และ 21.94 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณภาพของสิ่งทดลองทั้งหมดให้ผลดังนี้ (ตารางที่ 22) ปริมาณแอนโธไซยานินมีค่าตั้งแต่ 33.52-36.07 มิลลิกรัม /100 กรัมเมล็ดถั่วดำ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำสารสีให้เข้มข้นมีค่าตั้งแต่ 25-135 นาที ค่าสี L* แสดงค่าความสว่างอยู่ในช่วง 0.10-0.14, a* แสดงค่าสีแดง อยู่ในช่วง 0.08-0.34, b* แสดงค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 0.02-0.08, C* แสดงค่าความเข้มของสีอยู่ในช่วง 0.08-0.35 และ h แสดงค่ามุมของสีอยู่ในช่วง 13.01-13.27 องศา ซึ่งให้ค่าสีน้ำตาลแดง

การคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการทำเข้มข้นสารสี จะพิจารณาถึงความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งพบว่า การระเหยแบบระบบเปิดที่อุณหภูมิ 87 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาน้อยที่สุด คือ 25 นาที ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการระเหยแบบระบบเปิดโดยการระเหยด้วยน้ำเดือดโดยใช้หม้อแสตนเลสอังในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ระดับ 87±2 องศาเซลเซียส ในการทำสารสีเข้มข้น เนื่องจากใช้เวลาน้อยที่สุด ซึ่งมีปริมาณแอนโธไซยานิน เท่ากับ 29.83 มิลลิกรัม/ สารละลาย 100 มิลลิลิตร ค่าสี L*, C*, h เท่ากับ 0.10, 0.08, 13.10 องศา ตามลำดับ

6. <u>การทำแห้งสารสีที่สกัดได้โดยวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray drying)</u>

นำสารสีที่สกัดได้จากเมล็ดถั่วดำโดยสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3 มาทำให้เข้มข้นโดยการระเหยแบบระบบเปิดเป็นเวลา 25 นาที โดยการระเหยด้วยน้ำเดือดโดยใช้หม้อแสตนเลสอังในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ระดับ 87 ± 2 องศาเซลเซียส จนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สุดท้ายเท่ากับ 5 บริกซ์ วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 4.86 นำมาเติมมอลโตเด็กซ์ตริน D.E. 10 ซึ่งเป็นสารตัวพา มีหน้าที่เพิ่มปริมาณของแข็งให้กับสารสีก่อนเข้าทำแห้งแบบพ่นฝอย และช่วยลดการเกาะติดผนังภายในห้องทำแห้ง ในปริมาณร้อยละ 7.5 (Chen and Tang, 1998) วิเคราะห์คุณภาพปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด หลังเติมมอลโตเด็กซ์ตริน D.E. 10 พบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดร้อยละ 12.36 นำไปผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยสภาวะตาม (Chen and Tang, 1998; กิตติมา, 2549) (ภาพที่ 7) โดยนำสารสีจากเมล็ดถั่วดำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สารสีที่สกัดได้จากเมล็ดถั่วดำ ผงสีที่ผลิตได้จากเมล็ดถั่วดำมีสีน้ำตาล และมีคุณภาพดังนี้ (ตารางที่ 23) ปริมาณแอนโธไซยานิน เท่ากับ 3.087 มิลลิกรัม / ผงสี (กรัม) ความเป็นกรด-ด่าง 6.67 ค่าการละลายคิดเป็นร้อยละ 93.60 และค่าสี L*, C*, h เท่ากับ 53.91, 19.28 และ 52.31 องศา ตามลำดับ

<u>ตารางที่ 23</u> ลักษณะคุณภาพของผงสีจากเมล็ดถั่วดำที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ลักษณะคุณภาพ		ปริมาณ
ปริมาณแอนโธไซยานิน (มิลลิกรัม / กรัม)		3.087±0.01
ความเป็นกรด-ด่าง		6.67±0.02
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (ร้อยละ)		12.36±0.02
ค่าการละลาย (ร้อยละ)		93.60±0.14
ค่าสี	L*	53.91±0.11
	a*	12.04±0.15
	b*	15.25±0.13
	C*	19.28±0.15
	h	52.31±0.03

7. <u>การศึกษาการผลิตผงสีจากเมล็ดถั่วดำที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยในระดับนำร่อง (pilot plant scale)</u>

จากการศึกษาการผลิตผงสีธรรมชาติจากเมล็ดถั่วดำ (ภาพที่ 8) ในระดับนำร่องโดยใช้สภาวะในการสกัดสารสีจากเมล็ดถั่วดำที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนเมล็ดถั่วดำต่อน้ำเท่ากับ 1 : 4 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที นำสารละลายที่ได้มาระเหยน้ำออกจนมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 5 องศา บริกซ์ เติมมอลโทเดกซ์ตริน D.E. 10 ปริมาณร้อยละ 7.5 และนำไปทำแห้งแบบพ่นฝอยโดยสภาวะจากข้อ 6 พบว่า ในการผลิตผงสีธรรมชาติจากเมล็ดถั่วดำ 1 กิโลกรัม ใช้เมล็ดถั่วดำ 11,529.67 กรัม โดยเตรียมอัตราส่วนเมล็ดถั่วดำต่อน้ำกลั่นเท่ากับ 1:4 นำมาให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ โดยให้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที จะได้สารสีจากเมล็ดถั่วดำที่สกัดด้วยน้ำ 32,283.07 มิลลิลิตร นำสารสกัดทำให้เข้มข้นโดยการระเหยแบบระบบเปิดโดยการระเหยด้วยน้ำเดือดโดยใช้หม้อแสตนเลสอังในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ระดับ 87 ± 2 องศาเซลเซียส จนปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สุดท้ายเท่ากับ 5 บริกซ์ ได้สารสีจากเมล็ดถั่วดำ 11,363.64 มิลลิลิตร วิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 4.83 เติมมอลโตเด็กซ์ตริน D.E. 10 852.27 กรัม มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 12.33 ได้ปริมาณผลผลิตคิดเป็นร้อยละ 71.37 และมีราคาต้นทุนรวมของผงสีธรรมชาติจากเมล็ดถั่วดำที่คำนวณตามวิธีการของจีรพรรณ และคณะ (2525) พบว่า ถ้าสมมติรับผิดชอบราคาต้นทุนเมล็ดถั่วดำคิดเป็นร้อยละ 20-30 ผลิตภัณฑ์ผงสีธรรมชาติจากเมล็ดถั่วดำมีราคาต้นทุนรวมกิโลกรัมละ 241.20 – 345.41 บาท (ภาคผนวก จ) และเมื่อเทียบราคาขายกับผงแอนโธไซยานินจากองุ่นแดง (*Vitis vinifera*) ซึ่งมีปริมาณแอนโธไซยานินร้อยละ 5 ราคา 8,500 บาทต่อกิโลกรัม (บริษัท รามาโปรดักชั่น จำกัด) ดังนั้นผงสีธรรมชาติจากเมล็ดถั่วดำซึ่งมีปริมาณแอนโธไซยานินร้อยละ 0.31 ซึ่งจะมีราคาขาย 510 บาทต่อกิโลกรัม

ภาพที่ 7 เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตร และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำผงสีที่ผลิตได้จากเมล็ดถั่วดำมาวิเคราะห์คุณภาพผงสี (ตารางที่ 24) พบว่าผงสีมีปริมาณความชื้นร้อยละ 4.01 โปรตีนร้อยละ 8.16 ไขมันร้อยละ 0.47 เถ้าร้อยละ 6.09 ใยอาหารร้อยละ น้อยกว่า 0.1 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 81.3 (จากการคำนวณ) ค่าสี L*, C* และ h เท่ากับ 53.85, 19.72 และ 51.15 องศา ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นผงสีธรรมชาติจากเมล็ดถั่วดำเป็นสีน้ำตาล ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี เท่ากับ 0.270 ปริมาณแอนโธไซยานิน 3.09 มิลลิกรัม / ผงสี (กรัม) ทั้งนี้การลดลงของปริมาณแอนโธไซยานินเนื่องจากความร้อนจากการระเหยสารละลายและการทำแห้งแบบพ่นฝอย

ทำให้สารสีแอนโธไซยานินลดลง ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 12.33 ความเป็นกรดร้อยละ 0.08 ความเป็นกรด-ด่าง 6.69 ค่าการดูดความชื้น 0.523 กรัม (ภายในเวลา 360 นาที) ค่าความหนาแน่น 0.620 กรัม / มิลลิลิตร ค่าการละลายคิดเป็นร้อยละ 93.50 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด 4.33 $\times 10^{1}$ CFU ต่อกรัม (ค่าโดยประมาณ) โคลิฟอร์มน้อยกว่า 3 MPNต่อกรัม จำนวนยีสต์ รา และ *Staphylococcus aureus* น้อยกว่า10 CFUต่อกรัม (ค่าโดยประมาณ)

ภาพที่ 8 ผงสีที่ผลิตได้จากเมล็ดถั่วดำ

Al – Kahtani and Hassan (1990) กล่าวว่า ผงสีที่มีอนุภาคขนาดเล็ก จะมีค่าความหนาแน่นที่สูง ซึ่งจะทำให้ผงสีมีคุณภาพในการเก็บรักษาได้นานขึ้น Main *et al*.(1978) กล่าวว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนหลังการทำแห้ง มากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ปริมาณความชื้นลดลง และค่าความหนาแน่นต่ำ ซึ่งค่าความหนาแน่นต่ำจะมีผลทำให้ ผงสีที่ได้มีปริมาณอากาศอยู่ภายในมาก ผงจะมีลักษณะรูพรุน หรือโปร่ง ทำให้เกิดการออกซิเดชั่น ส่งผลให้ผงสีเก็บรักษาได้ไม่นาน

จากผลการศึกษาของ Al – Kahtani and Hassan (1990) ในการทำแห้งสารละลายจากดอกกระเจี๊ยบแดง คือ นำสารละลายจากดอกกระเจี๊ยบแดงที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 19 มาผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าทำแห้ง 193.7-203.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของลมร้อนหลังทำแห้ง 97.1-100.5 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าทำแห้ง 198.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิลมร้อนขาออกหลังการทำแห้ง 98.8 องศาเซลเซียส ให้ผงสีแดงจากดอกกระเจี๊ยบมีคุณภาพดีที่สุด โดยมีลักษณะคุณภาพของผงสีดังนี้ ปริมาณความชื้นร้อยละ 3.78, ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดร้อยละ 0.95, ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.41, ค่าความหนาแน่น 0.76 กรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 24 ลักษณะคุณภาพของผงสีจากเมล็ดถั่วดำที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยในระดับนำร่อง

ลักษณะคุณภาพ	ปริมาณ
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	4.01± 0.04
โปรตีน (ร้อยละ)	8.16±0.04
ไขมัน (ร้อยละ)	0.47±0.02
เถ้า (ร้อยละ)	6.09±0.02
ใยอาหาร (ร้อยละ)	น้อยกว่า 0.10
คาร์โบไฮเดรต* (ร้อยละ)	81.3
ค่าสี L*	53.86±0.21
a*	12.37±0.10
b*	15.36±0.14
C*	19.72±0.18
h	51.15±0.03
ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ (a_w)	0.270±0.01
ปริมาณแอนโธไซยานิน (มิลลิกรัม / ผงสี (กรัม))	3.09±0.01
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (ร้อยละ)	12.33±0.01
ความเป็นกรด (ร้อยละ)	0.08±0.01
ความเป็นกรด-ด่าง	6.69±0.02
ค่าการดูดความชื้น (กรัม)	0.523±0.02
ค่าความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	0.620±0.03
ค่าการละลาย (ร้อยละ)	93.50±0.10
จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (CFUต่อกรัม)	4.33×10^{1}(ค่าโดยประมาณ)
จำนวนยีสต์ และรา (CFUต่อกรัม)	น้อยกว่า 10 (ค่าโดยประมาณ)
โคลิฟอร์ม (MPN ต่อกรัม)	น้อยกว่า 3
Staphylococcus aureus (CFUต่อกรัม)	น้อยกว่า 10 (ค่าโดยประมาณ)

หมายเหตุ * ค่าจากการคำนวณ

นัยวิท (2538) ใช้สภาวะในการทำแห้งสารละลายจากดอกกระเจี๊ยบแดง คือ ที่อุณหภูมิของลมร้อนก่อนเข้าทำแห้ง 200 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของลมร้อนหลังทำแห้ง 100 องศาเซลเซียส ปรับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมดร้อยละ 20 - 25 โดยเติมมอลโตเด็กซ์ตรินปริมาณร้อยละ 35 ของปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมด ได้ผงสีที่มีลักษณะคุณภาพดังนี้ ปริมาณความชื้นร้อยละ 3.14, ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมดร้อยละ 1.0, ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.87, ค่าความเป็นกรดร้อยละ 0.19, ค่าความหนาแน่น 0.897 กรัมต่อมิลลิลิตร, ค่าการละลาย 0.313 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ 0.11 และค่าสี L*, a*, b* เท่ากับ 31.46, 21.30, 7.70 ตามลำดับ

กิตติมา (2549) ใช้สภาวะในการทำแห้งสารละลายจากแครอท คือ อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าทำแห้ง 135 - 145 องศาเซลเซียส และหลังการทำแห้ง 90 - 100 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมดร้อยละ 2.47 โดยเติมมอลโตเด็กซ์ตรินปริมาณร้อยละ 10 ได้ผงสีที่มีลักษณะคุณภาพดังนี้ ปริมาณความชื้นร้อยละ 3.89, ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมดร้อยละ 12.48, ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.34, ค่าความเป็นกรดร้อยละ 0.18, ค่าการดูดความชื้น 0.82 กรัม, ค่าความหนาแน่น 0.64 กรัมต่อมิลลิลิตร, ค่าการละลาย 0.24 กรัมต่อ 10 มิลลิลิตร และค่าสี L*, a*, b*, C*, h เท่ากับ 83.26, 6.56, 22.26, 23.20, 73.58 ตามลำดับ

8. <u>การศึกษาความคงตัวของสารสีต่อความเป็นกรด-ด่าง และความร้อน</u>

ปัญหาการใช้สีธรรมชาติ คือ ความไม่คงตัวเกิดการสลายตัวได้ง่าย เนื่องจากสภาวะต่างๆ ของกระบวนการแปรรูปและสภาวะการเก็บรักษา ทำให้สีซีดจางลงหรือมีการเปลี่ยนสีไป ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของสารสี ได้แก่ ความร้อนหรืออุณหภูมิ และระดับความเป็นกรด-ด่าง เป็นต้น (Nielsen *et al*., 2002; ศิวาพร, 2529)

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของสารสีแอนโธไซยานินจากเมล็ดถั่วดำที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง 5 ระดับได้แก่ 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 โดยปรับระดับความเป็นกรด-ด่างด้วยสารละลายซิเตรต-ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ นำมาให้ความร้อน 3 ระดับ ดังนี้ ไม่ผ่านความร้อน (อุณหภูมิห้อง) ให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ (70 องศาเซลเซียส 30 นาที) และให้ความร้อนระดับสเตอริไรซ์ (100 องศาเซลเซียส 20 นาที หรือ 121 องศาเซลเซียส 15 นาที) รวม 15 สิ่งทดลอง พบว่า ระดับความเป็นกรด-ด่างมีอิทธิพลต่อปริมาณแอนโธไซยานิน ค่าการละลาย และค่าสี (ตาราง

ที่ 25-26) ความเป็นกรด-ด่าง มีผลให้ปริมาณแอนโธไซยานินและค่าร้อยละของการละลายมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่เมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ปริมาณแอนโธไซยานินมีแนวโน้มลดลง ร้อยละของการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 3.0–4.0 สารละลายสีมีปริมาณแอนโธไซยานินสูง แต่มีร้อยละการละลายต่ำ โดยสารละลายจะมีตะกอนของผงสีแขวนลอยอยู่ ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 5.0-7.0 มีร้อยละการละลายสูง โดยที่สารละลายที่ได้ไม่เกิดการแขวนลอยและตกตะกอนของผงสี

เมื่อพิจารณาผลของการให้ความร้อนต่อความคงตัวของสารสี พบว่า การให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อปริมาณแอนโธไซยานิน ค่าการละลาย และค่าสี โดยการให้ความร้อนทั้ง 3 ระดับมีผลทำให้ปริมาณแอนโธไซยานินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เมื่อการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณแอนโธไซยานินมีแนวโน้มลดลง โดยพบว่าสารละลายสีที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนมีความคงตัวสูงที่สุด และมีความคงตัวต่อความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ได้ดีกว่าระดับสเตอริไรซ์ (ตารางที่ 25) เนื่องจากการให้ความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวของสารสีเพิ่มขึ้น Neela *et al*. (2002) กล่าวว่าสารละลายสีธรรมชาติจะมีความคงตัวดีที่อุณหภูมิห้อง คือ ไม่ผ่านการให้ความร้อน

การให้ความร้อนทั้ง 3 ระดับมีผลทำให้ร้อยละของการละลายมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้ การให้ความร้อนระดับพาสเจอร์ไรซ์ และระดับสเตอริไรซ์ ไม่ทำให้การละลายของสารละลายผงสีมีความแตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับสารละลายผงสีที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งสารละลายผงสีที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ให้ค่าร้อยละของการละลายสูงที่สุด (ตารางที่ 26)

ความเป็นกรด-ด่างทั้ง 5 ระดับมีผลทำให้ค่าสี L*, C* และ h มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 27) พบว่า ทั้งนี้เมื่อเพิ่มระดับความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเข้มของสี C* จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าความสว่าง L* มีค่าอยู่ในช่วง 37.12-41.79, ค่าความเข้มของสี C* มีค่าอยู่ในช่วง 44.86-71.39 และค่ามุมของสี h มีค่าอยู่ในช่วง 57.07-61.40 องศา ซึ่งแสดงค่าสีน้ำตาล

ตารางที่ 25 ผลของระดับอุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณแอนโธไซยานิน ในการสกัดสีจากเมล็ดถั่วดำ

ระดับการให้ความร้อน	ระดับความเป็นกรด-ด่าง					ค่าเฉลี่ยปริมาณแอนโธไซยานิน (มก. / ผงสี (กรัม))
	3	4	5	6	7	
ไม่ให้ความร้อน	3.32	3.29	3.18	3.13	2.79	3.14a
พาสเจอร์ไรซ์	3.25	3.21	3.13	2.90	2.45	2.99b
สเตอริไรซ์	3.00	2.90	2.92	2.74	2.34	2.78c
ค่าเฉลี่ยปริมาณแอนโธไซยานิน (มก. / ผงสี 1 (กรัม))	3.19A	3.13B	3.08C	2.92D	2.53E	

หมายเหตุ a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้ง ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของระดับการให้ความร้อน
A-E หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของระดับความเป็นกรด-ด่าง

ตารางที่ 26 ผลของระดับความเป็นกรด-ด่างและการให้ความร้อนต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละของการละลายในการสกัดสีจากเมล็ดถั่วดำ

ระดับการให้ความร้อน	ระดับความเป็นกรด-ด่าง					ค่าเฉลี่ยร้อยละของการละลาย
	3	4	5	6	7	
ไม่ให้ความร้อน	89.93	90.30	92.00	92.33	93.93	91.70a
พาสเจอร์ไรซ์	87.43	88.43	91.87	91.93	93.23	90.58b
สเตอริไรซ์	87.53	88.03	90.77	91.97	93.20	90.30b
ค่าเฉลี่ยร้อยละของการละลาย	88.30C	88.92C	91.54B	92.08B	93.46A	

หมายเหตุ a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้ง ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของระดับการให้ความร้อน
A-C หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวนอน ที่มีตัวอักษรต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของระดับความเป็นกรด-ด่าง