บทที่ 3

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. คุณภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบ

ข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 3 แหล่ง คือ จังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญ เป็นข้าวที่เก็บเกี่ยวในช่วงเดือนมิถุนายน 2546 และผ่านการขัดสีแล้ว มีคุณภาพของเมล็ดข้าว ได้แก่ ความกว้าง ยาว อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างและน้ำหนักเมล็ด พบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีความกว้าง ยาวและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างไม่แตกต่างกัน (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 2) โดยความกว้างเมล็ดข้าวอยู่ในช่วง 1.95-1.97 มิลลิเมตร ความยาวอยู่ในช่วง 7.28-7.31 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างในช่วง 3.71-3.75 ซึ่งตรงตามลักษณะของเมล็ดข้าวหอมมะลิไทยที่กำหนดความยาวของเมล็ดข้าวไม่ต่ำกว่า 7.0 มิลลิเมตรและอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างไม่ต่ำกว่า 3.0 มิลลิเมตร (กระทรวงพาณิชย์, 2541) ส่วนน้ำหนักเมล็ดข้าวจากแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกัน (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 2) โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดอำนาจเจริญมีน้ำหนักเมล็ดโดยเฉลี่ยมากสุดเท่ากับ 1.90 กรัมต่อ 100 เมล็ด (ตารางที่ 7)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีผลต่อคุณภาพข้าวสุก ได้แก่ ความชื้นและปริมาณอะมิโลส พบว่าปริมาณความชื้นและปริมาณอะมิโลสในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.65, 12.73, 12.55 และร้อยละ 22.35, 22.18, 21.87 ตามลำดับ (ตารางที่ 7) โดยปริมาณความชื้นและปริมาณอะมิโลสในข้าวสารจากแต่ละแหล่งมีค่าไม่แตกต่างกัน (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 3) ซึ่งปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามกำหนดของปริมาณความชื้นในข้าวหอมมะลิไทยทุกประเภทไม่เกินร้อยละ 14.0 (กระทรวงพาณิชย์, 2541) และปริมาณอะมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 20-25
ซึ่งจัดเป็นข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสปานกลาง (Juiano, 1985)

จากผลการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนส (lipoxygenase, LOX) ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน พบว่าข้าวสารจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสเท่ากับ 49.73, 69.19 และ

60.71 หน่วยต่อมิลลิกรัมโปรตีน ตามลำดับ (ตารางที่ 8) โดยกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนส

ตารางที่ 7 คุณภาพของเมล็ดข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

Grain qualities of raw KDML 105 milled rice

Quality	Source		
	Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
breadth (mm)	1.96 $\pm$ 0.01^{ns}	1.97 $\pm$ 0.04^{ns}	1.95 $\pm$ 0.03^{ns}
length (mm)	7.28 $\pm$ 0.03^{ns}	7.30 $\pm$ 0.02^{ns}	7.31 $\pm$ 0.05^{ns}
L/B ratio	3.72 $\pm$ 0.03^{ns}	3.71 $\pm$ 0.07^{ns}	3.75 $\pm$ 0.06^{ns}
weight (g/100 kernels)	1.86 $\pm$ 0.02^{b}	1.81 $\pm$ 0.01^{a}	1.90 $\pm$ 0.01^{c}
moisture content (%)	12.65 $\pm$ 0.29^{ns}	12.73 $\pm$ 0.54^{ns}	12.55 $\pm$ 0.48^{ns}
amylose content (%)	22.35 $\pm$ 0.61^{ns}	22.18 $\pm$ 0.68^{ns}	21.87 $\pm$ 0.49^{ns}

Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.

The different superscripts in the same row denote the significant differences (p<0.05)

^{ns} not significant at (p>0.05)

ตารางที่ 8 กิจกรรมและกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสของข้าวสารพันธุ์ขาวดอก

มะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน

Total LOX activity and specific LOX activity of raw KDML 105 milled rice from different sources

Source	Total LOX activity (unit/ml)	Total protein (mg/ml)	Specific LOX activity (unit/mg protein)
Surin province	50.72 $\pm$ 11.12^{ns}	1.02 $\pm$ 0.03^{ns}	49.73 $\pm$ 12.13^{ns}
Khonkean province	78.18 $\pm$ 18.69^{ns}	1.13 $\pm$ 0.05^{ns}	69.19 $\pm$ 13.61^{ns}
Aumnadjarean province	69.21 $\pm$ 9.40^{ns}	1.14 $\pm$ 0.09^{ns}	60.71 $\pm$ 11.17^{ns}

Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.

^{ns} not significant at (p>0.05)

ในข้าวสารจากแหล่งปลูกต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกัน (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 4) ซึ่งโดยทั่วไปกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจีเนสจะถูกจำกัดอยู่เฉพาะส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวซึ่งเป็นแหล่งของกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่มาก จึงเป็นสารตั้งต้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเพอออกไซด์ (Suzuki *et al.,* 1999)

จากการศึกษาชนิดสารที่ระเหยได้ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายแล้วนำสารที่สกัดได้มาวิเคราะห์ด้วย Gas chromatography-Mass spectrometry (GC-MS) (ดังตารางภาคผนวกที่ 1) ได้โครมาโตแกรมของสารที่ระเหยได้ดังแสดงในภาพผนวกที่ 4 โดยพบสารที่ระเหยได้ในข้าวสารจากจังหวัดสุรินทร์ จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดอำนาจเจริญมีจำนวน 19, 18 และ 18 ชนิด ตามลำดับ สามารถแบ่งสารที่ระเหยได้ที่พบออกเป็น 7 กลุ่ม คือ ไฮโดรคาร์บอน แอลกอฮอล์ คาร์บอนิล อะโรมาติก กรดฟีนอลิก และสารที่ระเหยได้กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (ตารางที่ 9) โดยข้าวสารจากจังหวัดสุรินทร์เท่านั้นที่มี 2-ethyl-1-hexanol (ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่น grassy) (Pelayo *et al*., 2003) (ภาพผนวกที่ 4a, peak 6) ซึ่งไม่พบในข้าวสารอีก 2 แหล่ง และหากพิจารณาจากค่า odour threshold (T) จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ppb ในสารละลายน้ำ (Fang *et al*., 1999) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับของค่า T ของสารให้กลิ่นรสในข้าวหอมหุงสุกพันธุ์ California long-grain ได้แก่ สารในกลุ่มแอลดีไฮด์ (0.007-2 ppb) และ 2AP (0.1 ppb) จึงจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่ระเหยได้ง่ายที่มีอิทธิพลต่อกลิ่นรสในอาหาร (Buttery *et al*., 1988) ยังไม่มีรายงานการพบสาร 2-ethyl-1-hexanol ในตัวอย่างข้าว (Buttery *et al.,* 1982; Jezussek *et al*., 2002; Maga, 1984; Mahatheeranont *et al*., 2001; Widjaja *et al*., 1996a) ดังนั้นการพบสารชนิดนี้เฉพาะในข้าวสารจากจังหวัดสุรินทร์อาจเนื่องมาจากขั้นตอนภายหลังการเก็บเกี่ยวหรือเก็บในโรงเรือน ส่วนสารที่ระเหยได้กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่พบในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากทั้ง 3 แหล่ง คือ 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) ทำหน้าที่เป็นสารให้กลิ่นรสหลักในข้าวหอมและในกลุ่มสารคาร์บอนิล ได้แก่ n-hexanal และ n-nonanal ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นไม่พึงประสงค์ (off-odor) สอดคล้องกับ Mahatheeranont และคณะ (2001) ที่รายงานการพบสาร 2AP ที่ให้กลิ่นรสในข้าวกล้องพันธุ์ดอกมะลิ 105 ส่วนสารคาร์บอนิลที่พบ คือ n-hexanal และ n-nonanal ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันของไขมันในระหว่างการเก็บรักษา (Vidyasagar *et al*., 1991)

ตารางที่ 9 สารที่ระเหยได้ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน

Volatile compounds in raw KDML 105 milled rice from different sources

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
Hydrocarbons						
3,4,5-trimethyl-1-hexene	8.00	970	126	ND	3.73	3.64
3-methylnonane	8.33	978	142	2.39	2.40	4.03
n-decane	9.23	1000	142	45.99	43.82	48.05
3,3-dimethyloctane	9.98	1022	142	2.18	2.48	2.56
n-undecane	12.64	1100	156	5.16	14.94	6.75
cyclopropane	14.92	1165	168	1.23	ND	ND
1-dodecene	15.82	1191	168	ND	2.91	1.41
n-dodecane	16.09	1199	168	ND	1.15	1.28
3-tetradecene	15.87	1193	196	4.13	ND	ND
5-tetradecene	16.12	1200	196	2.31	ND	ND
1-tetradecene	22.41	1391	196	6.04	5.82	1.96
1-hexadecene	28.38	1592	224	2.09	2.44	1.56
1-octadecene	33.76	1792	252	1.84	1.47	1.80
Alcohols						
2-hexanol	5.44	925	102	4.08	3.57	4.32
2-ethyl-1-hexanol	7.98	970	130	3.90	ND	ND

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ND : not detected

ตารางที่ 9 (ต่อ)

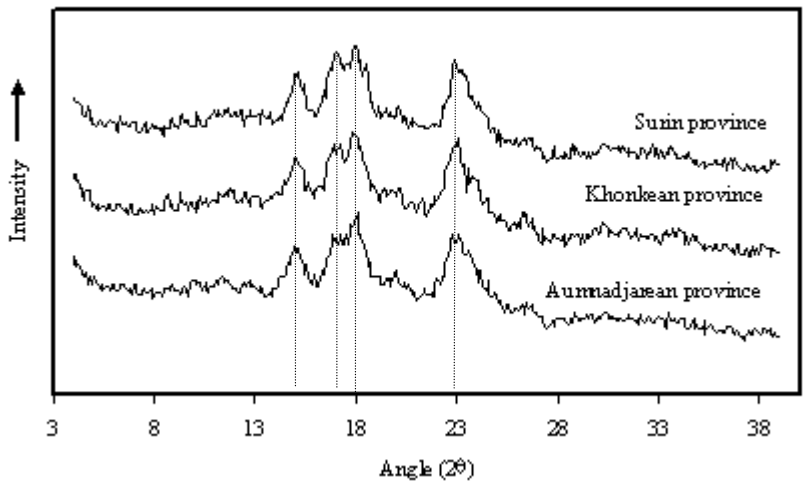
Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
Aldehydes and Ketones						
n-hexanal	4.10	816	100	1.81	1.80	2.33
n-nonanal	12.90	1107	142	2.91	2.95	3.73
Aromatics						
toluene	3.97	806	92	1.22	1.76	1.69
xylene	6.17	925	106	1.71	1.65	1.94
Acids						
1,2-benzenedicarboxylic acid	38.13	1971	278	1.18	1.93	1.82
Phenolic Compounds						
2,4-bis (1,1-dimethylethyl) phenol	26.29	1519	206	ND	2.14	ND
2,6-bis (1,1-dimethylethyl) -4-methyl-phenol	26.25	1518	220	5.95	ND	5.20
Nitrogen Compounds						
2-acetyl-1-pyrroline	7.02	946	111	3.87	3.04	5.92

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ND : not detected

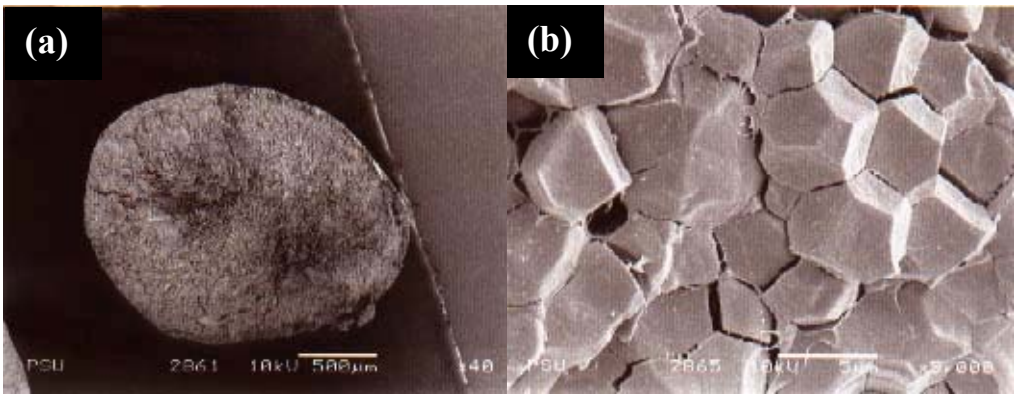
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิจากแหล่งปลูกต่างกัน 3 แหล่งด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) โดยหลอดรังสีเอกซ์นี้ใช้คอปเปอร์เป็นแหล่งผลิตรังสี (Cu-source) และกำหนดค่ามุมของการหักเห (2θ) อยู่ในช่วง 4.00-38.97° พบว่าข้าวสารจากทั้ง 3 แหล่งให้พีคแหลม (sharp peak) ที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ (ภาพที่ 10) เมื่อพิจารณาค่า d-spacing พบว่าข้าวสารจากทั้ง 3 แหล่งมีค่า d-spacing เท่ากับ 5.8, 5.2, 4.9 และ 3.8 Å สอดคล้องกับการทดลองของ Iturriaga และคณะ (2004) ที่รายงานว่าแป้งข้าวเจ้าแตกต่างกัน 7 พันธุ์มีค่า d-spacing ไม่แตกต่างกันโดยเท่ากับ 5.8, 5.2, 4.9 และ 3.8 Å การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสามารถใช้ในการจำแนกชนิดแป้งและชนิดของโครงสร้าง (Vandeputte *et al*., 2003) จัดอยู่ในลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A (A-type) ซึ่งพบส่วนใหญ่ในแป้งจากธัญพืช (Zobel, 1964) และจากการคำนวณปริมาณผลึกโดยใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่พีคแหลมที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ ต่อพื้นที่ทั้งหมด เริ่มจากพีคที่ 15.2 ถึง 22.9°2θ ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิจากแหล่งปลูกต่างกัน พบว่าปริมาณผลึกของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่นและอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับร้อยละ 38.33,
37.53 และ 39.82 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงปริมาณผลึกในเม็ดสตาร์ชที่เกิดจากการเรียงตัวกันแน่นอย่างเป็นระเบียบของอะมิโลเพกตินสายโซ่ตรง (crystalline regions) ขณะที่สายโซ่กิ่งและโมเลกุลอะมิโลสคือ ส่วนประกอบหลักในส่วนที่มีการเรียงตัวแบบหลวมๆ และไม่เป็นระเบียบ (amorphous regions) (Blanshard, 1987) Lugay และคณะ (1965 อ้างโดย Juliano, 1985) รายงานการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ในแป้งข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสในช่วงร้อยละ 13.7-32.8 พบว่าปริมาณอะมิโลส
แตกต่างกันไม่มีผลต่อรูปแบบโครงสร้างผลึก



ภาพที่ 10 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน

X-ray diffractograms of raw KDML 105 milled rice from different sources

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายในเมล็ดข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยส่องภายใต้กล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) จากภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่กำลังขยาย 40 เท่า และค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 kV แสดงให้เห็นส่วนของเนื้อเมล็ด (endosperm) (ภาพที่ 11a) โดยส่วนของเนื้อเมล็ดเป็นเซลล์ที่มีผนังบางหุ้มเม็ดสตาร์ชที่เป็นองค์ประกอบหลักของเมล็ดข้าว โดยมีอยู่ประมาณร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารอื่น ได้แก่ โปรตีน และไขมัน (Azhakanandam *et al.,* 2000 อ้างโดย Zhou *et al.,* 2002) เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างต่างๆ กันขึ้นอยู่กับบริเวณของเมล็ด ถ้าอยู่ใกล้ชั้นเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดจะมีรูปร่างยาวรีถัดเข้ามายิ่งเข้าใกล้ใจกลางเมล็ดจะยิ่งกลมมนขึ้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538; Juliano, 1985) และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5000 เท่า พบเม็ดสตาร์ชที่มีลักษณะหลายเหลี่ยม รูปร่างไม่แน่นอนจัดเรียงตัวกันแน่นภายในส่วนของเนื้อเมล็ด (ภาพที่ 11b) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการทดลองของ Hayakawa และคณะ (1980) และ Ellis และคณะ (1998) รายงานว่าเม็ดสตาร์ชคือส่วนประกอบที่เล็กที่สุดในเนื้อเมล็ดข้าว มีขนาดเฉลี่ย 3-8 ไมโครเมตรและมีรูปร่างหลายเหลี่ยมไม่สมมาตร



ภาพที่ 11 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เมื่อส่องภายใต้กล้อง SEM ที่

กำลังขยาย 40 เท่า (a) และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ชภายในเนื้อเมล็ดที่กำลังขยาย 5000 เท่า (b)

Cross section of raw KDML 105 milled rice observed by SEM (x40) (a) and starch granules within the endosperm cells (x5000) (b)

2. ผลของการใช้ความร้อนและการใช้ความดันสูงต่อการสุกของข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการนำข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 3 แหล่งจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญ มาทำให้สุกด้วย 2 วิธีการ ได้แก่ การใช้ความร้อน และการใช้ความดันสูง หลังจากนั้นวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าว ได้ผลดังนี้

2.1 ผลของการใช้ความร้อน

จากการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการทำให้ข้าวสุกโดยการใช้ความร้อนแบบวิธีนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที แล้ววิเคราะห์คุณภาพของข้าวสุก ได้ผลดังนี้

คุณภาพเมล็ดของข้าว 3 แหล่ง ภายหลังการทำให้สุกโดยการใช้ความร้อน โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำต่อข้าวเป็น 3 ระดับ คือ 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1 ได้แก่ อัตราการยืดตัวของเมล็ด และความแข็งของเนื้อสัมผัส พบว่าข้าวสุกจากแหล่งปลูกต่างกันมีค่าอัตราการยืดตัวของเมล็ดไม่แตกต่างกัน (p>0.05) ขณะที่ระดับอัตราส่วนน้ำมีผลต่อค่าอัตราการยืดตัวของเมล็ด (p<0.05) เมื่อใช้ระดับอัตราส่วนน้ำสูงขึ้นมีผลให้ข้าวสุกมีอัตราการยืดตัวของเมล็ดเพิ่มขึ้น โดยค่าเฉลี่ยอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญที่ระดับอัตรา

ส่วนน้ำต่อข้าวที่ระดับ 2 : 1 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.66, 1.59 และ 1.66 ตามลำดับ (ตารางที่ 10) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งปลูกและระดับอัตราส่วนน้ำ พบว่า 2 ปัจจัยนี้มีผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราการยืดตัวของเมล็ด (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 5)

ผลการวิเคราะห์ความแข็งของเนื้อสัมผัสภายหลังการทำให้ข้าวสุกด้วยความร้อน พบว่าแหล่งปลูก และระดับอัตราส่วนน้ำที่แตกต่างกันมีค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสแตกต่างกัน (p <0.05) เมื่อใช้ระดับอัตราส่วนน้ำสูงขึ้นมีผลให้ค่าความแข็งเนื้อสัมผัสของข้าวสุกลดลง โดยค่าเฉลี่ยความแข็งของข้าวสุกจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 2 : 1 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 53.60, 56.66 และ 54.66 นิวตัน ตามลำดับ (ตารางที่ 10) อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งปลูกและระดับอัตราส่วนน้ำ พบว่า 2 ปัจจัยนี้มีผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราการยืดตัวของเมล็ด (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 6) และเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสและอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกโดยการใช้ความร้อน พบว่าที่ระดับอัตรา

ส่วนน้ำสูงขึ้นมีผลให้ข้าวสุกมีค่าอัตราการยืดตัวของเมล็ดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสมีค่าลดลง (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 คุณภาพของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที

Grain qualities of cooked KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min

Source	Water-rice ratio	Elongation ratio	Moisture content (%)	Hardness (N)
Surin province	1 : 1	1.26 ± 0.05^{a}	52.72 ± 0.55^{a}	139.21 ± 1.64^{e}
	1.5 : 1	1.44 ± 0.03^{b}	61.27 ± 0.48^{b}	73.09 ± 2.97^{c}
	2 : 1	1.66 ± 0.06^{d}	68.28 ± 0.30^{de}	53.60 ± 1.46^{a}
Khonkean province	1 : 1	1.33 ± 0.07^{a}	52.19 ± 1.35^{a}	152.80 ± 1.68^{g}
	1.5 : 1	1.53 ± 0.02^{c}	62.77 ± 0.94^{c}	77.09 ± 0.38^{d}
	2 : 1	1.59 ± 0.01^{c}	68.18 ± 1.23^{d}	56.66 ± 0.50^{b}
Aumnadjarean province	1 : 1	1.30 ± 0.01^{a}	52.74 ± 0.44^{a}	149.37 ± 1.87^{f}
	1.5 : 1	1.49 ± 0.01^{bc}	62.72 ± 0.14^{c}	76.86 ± 0.27^{d}
	2 : 1	1.66 ± 0.02^{d}	69.57 ± 0.22^{e}	54.66 ± 2.01^{ab}

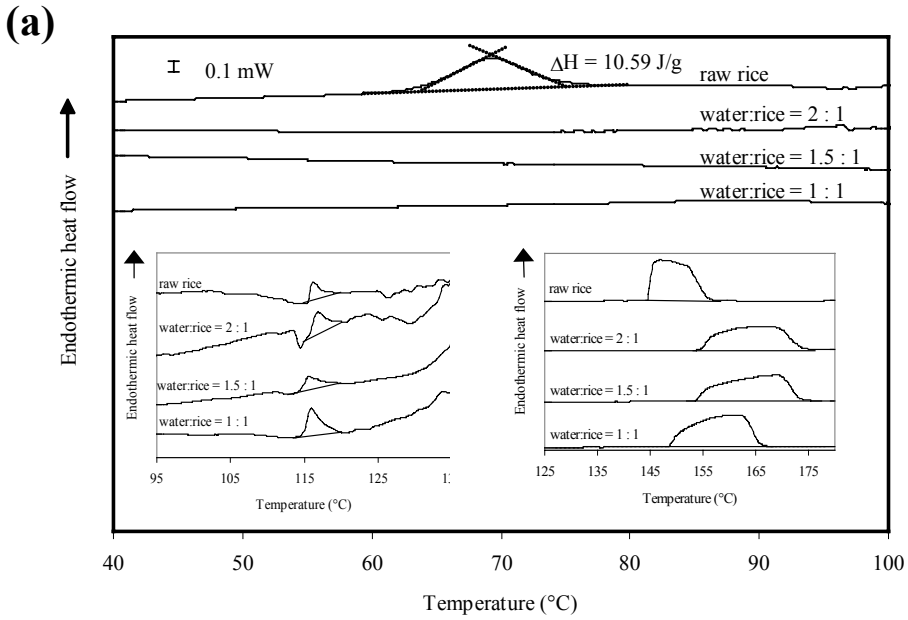
Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.

The different superscripts in the same column denote the significant differences (p<0.05).

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น และการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน ภายหลังการทำให้สุกโดยใช้ความร้อนที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1 พบว่าระดับอัตราส่วนน้ำที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณความชื้น (p <0.05) โดยที่ระดับอัตราส่วนน้ำสูงขึ้นมีผลให้ข้าวสุกมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น โดยปริมาณความชื้นเฉลี่ยของข้าวสุกจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 2 : 1 มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 68.28, 68.18 และ 69.57 ตามลำดับ (ตารางที่ 10) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแหล่งปลูกและระดับอัตราส่วนน้ำ พบว่า 2 ปัจจัยนี้ไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของปริมาณความชื้น (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 7)

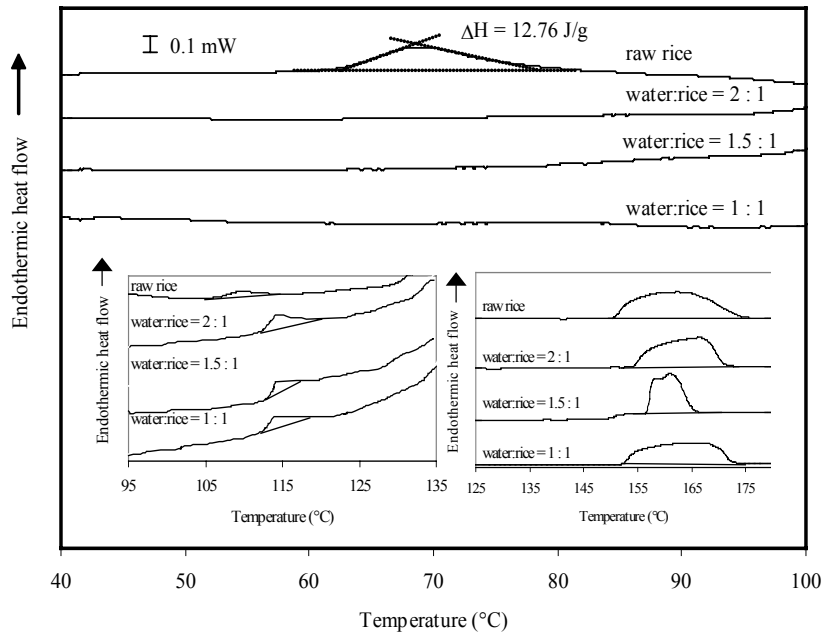
ผลการวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนซ์ด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน ภายหลังการทำให้สุกโดยใช้ความร้อนที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1 พิจารณาจากเทอร์โมแกรม ซึ่งในข้าวดิบโดยทั่วไปแล้วจะพบพีคของการเจลาติไนซ์ของแป้งปรากฏให้เห็นอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 63-78.4°ซ มีค่าพลังงานในการเจลาติไนซ์อยู่ในช่วงระหว่าง 11.3-17.3 จูลต่อกรัม และจะไม่พบพีคของการเจลาติไนซ์ของแป้งในตัวอย่างที่เกิดเจลาติไนซ์แล้ว (Russell and Juliano, 1983 อ้างโดย Juliano, 1985) จากการทดลองพบว่าเทอร์โมแกรมของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่งไม่ปรากฏค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อข้าวที่ใช้ ขณะที่ในข้าวดิบในแต่ละแหล่งที่แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ (ภาพที่ 12) แสดงให้เห็นว่าข้าวสุกโดยใช้ความร้อนที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวแตกต่างกันจากทั้ง 3 แหล่งเกิดการเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์ เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำแล้วพองตัวและแตกออกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง มีผลให้สูญเสียรูปร่างเดิมของเม็ดสตาร์ชและการจัดเรียงตัว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) (Biliaderis *et al*., 1980; Biliaderis *et al*., 1986a; Donovan, 1979; Evan and Haisman, 1982; Zobel *et al*., 1988) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kugimiya และคณะ (1980) ที่รายงานว่าจะไม่ปรากฏค่าพลังงานเจลาติไนซ์เมื่อนำแป้งสุกมาให้ความร้อนซ้ำในการวิเคราะห์ด้วย DSC แต่จะพบพีคเล็ก (Enthalpy; ΔH อยู่ระหว่าง 0.2-2.6 จูลต่อกรัม) ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันที่อุณหภูมิประมาณ 92-112°ซ (Biliaderis *et al*., 1985; Marshall *et al*., 1990) ข้าวดิบจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีช่วงอุณหภูมิ (อุณหภูมิเริ่มต้นเจลาติไนซ์ (T_o)-อุณหภูมิสิ้นสุดเจลาติไนซ์ (T_c)) และ ΔH อยู่ระหว่าง 63.69-74.77, 62.15-78.42, 63.09-77.54°ซ และ 10.59, 12.76, 11.01 จูลต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 11) สอดคล้องกับการทดลองของ Noosuk และคณะ (2003) ซึ่งรายงานช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานเจลาติไนซ์ของสตาร์ชจากข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 อยู่ระหว่าง 61.76-74.98°ซ และ 12.66 จูลต่อกรัม ตามลำดับ จากการทดลองของ Normand และ Marshall (1989) ที่รายงานว่าข้าวทั้งเมล็ดและแป้งข้าวมีความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ ซึ่งผลการตรวจสอบด้วย DSC พบว่าข้าวทั้งเมล็ดและแป้งข้าวมี T_o ใกล้เคียงกัน (65.4 และ 65.3°ซ) แต่ข้าวทั้งเมล็ดมีช่วงอุณหภูมิในการเจลาติไนซ์กว้างกว่าและค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์สูงกว่าแป้งข้าว (33.2, 16.9 และ 15.8, 10.5 จูลต่อกรัม) เนื่องจากความแข็งแรงของโครงสร้างเมล็ดที่ขัดขวางการดูดซับน้ำ และเทอร์โมแกรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกโดยการใช้ความร้อนจากทั้ง 3 แหล่ง แสดงพีคในช่วงอุณหภูมิ 105-120°ซ และ 144-180°ซ โดยมีค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1.12-3.91 และ 4360-7599 จูลต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 11) แสดงถึงค่าพลัง

งานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Costas และคณะ (1993) ซึ่งศึกษาสมบัติในเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าวสารพันธุ์ต่างๆ ด้วย DSC พบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน โดยสารประกอบเชิงซ้อนชนิดแรกจะมีอุณหภูมิในการหลอม (melting temperature, T_m) ต่ำกว่า 100°ซ และสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 2 มี T_m สูงกว่า 100°ซ สอดคล้องกับหลายรายงานการทดลองที่ระบุว่าเทอร์โมแกรมของสตาร์ชที่วิเคราะห์ด้วย DSC นั้นจะมีพีคปรากฏในช่วงอุณหภูมิสูง (>100°ซ) โดยความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการหลอมขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของโครงสร้างโมเลกุล หรืออาจพบพีคของสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวในเจลแป้งที่เกิดรีโทรกราเดชัน (Biliaderis *et al*., 1986b; Biliaderis and Galloway,
1989; Biliaderis and Seneviratne, 1990; Donovan *et al*., 1983; Galloway *et al*., 1989)

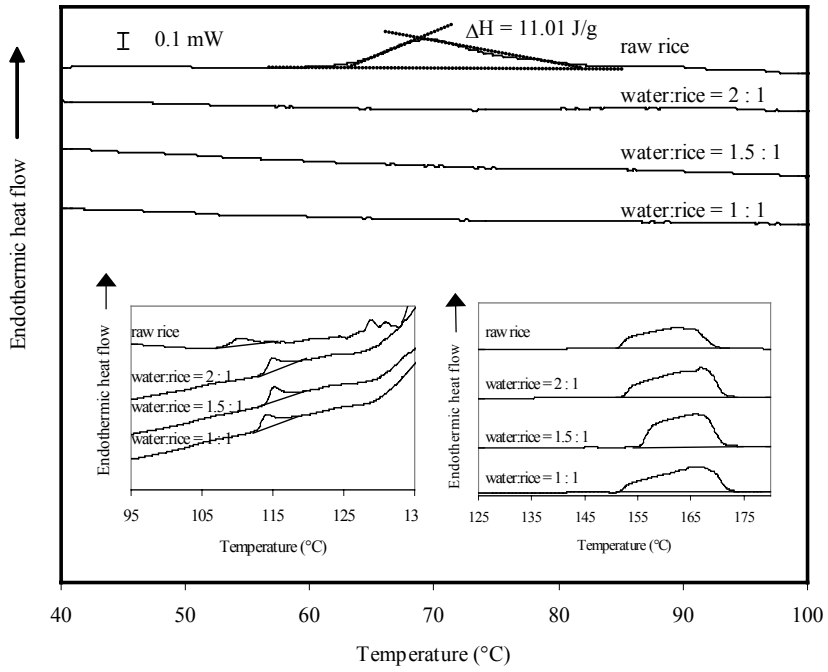


ภาพที่ 12 เทอร์โมแกรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ
100°ซ นาน 30 นาที จากจังหวัดสุรินทร์ (a), จังหวัดขอนแก่น (b) และจังหวัดอำนาจเจริญ (c)
DSC thermograms of raw and cooked KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min from Surin province (a), Khonkean province (b) and Aumnadjarean province (c)

(b)


0.1 mW
ΔH = 12.76 J/g
raw rice
water:rice = 2 : 1
water:rice = 1.5 : 1
water:rice = 1 : 1
Endothermic heat flow
40
50
60
70
80
90
100
Temperature (°C)
95
105
115
125
135
125
135
145
155
165
175
Temperature (°C)

(c)


0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
water:rice = 2 : 1
water:rice = 1.5 : 1
water:rice = 1 : 1
Endothermic heat flow
40
50
60
70
80
90
100
Temperature (°C)
95
105
115
125
13
125
135
145
155
165
175
Temperature (°C)

ภาพที่ 12 (ต่อ)

ตารางที่ 11 ช่วงอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์โดยใช้ DSC ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที จากแหล่งปลูกต่างกัน

Gelatinization temperature range and enthalpy of raw and cooked KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min from different sources

Source	Water-rice ratio	Gelatinization temperature (°C)			Enthalpy (ΔH)(J/g)	Enthalpy (ΔH)(J/g) (Melting temperature (T_o-T_c) (°C))	
		T_o	T_p	T_c		complex I[a]	complex II[b]
Surin province							
raw rice	-	63.69	69.17	74.77	10.59	2.16 (114.50-120.50)	5822.63 (144.17-160.00)
cooked rice	1 : 1	ND	ND	ND	ND	3.91 (113.83-121.00)	7048.02 (148.17-170.00)
	1.5 : 1	ND	ND	ND	ND	1.18 (114.00-121.67)	6531.47 (152.67-178.67)
	2 : 1	ND	ND	ND	ND	1.96 (114.67-120.83)	6084.77 (152.83-178.50)
Khonkean province							
raw rice	-	62.15	69.00	78.42	12.76	1.33 (106.33-116.17)	7599.10 (149.00-180.00)
cooked rice	1 : 1	ND	ND	ND	ND	1.84 (112.67-121.67)	6099.26 (152.00-179.50)
	1.5 : 1	ND	ND	ND	ND	1.58 (105.28-113.04)	4360.77 (156.17-170.33)
	2 : 1	ND	ND	ND	ND	1.58 (112.81-116.19)	6284.33 (152.17-178.00)
Aumnadjarean province							
raw rice	-	63.09	69.50	77.54	11.01	1.38 (107.33-117.83)	4980.02 (150.67-176.33)
cooked rice	1 : 1	ND	ND	ND	ND	1.39 (113.00-121.83)	6202.05 (150.50-176.67)
	1.5 : 1	ND	ND	ND	ND	1.37 (113.83-120.83)	6816.30 (152.83-178.50)
	2 : 1	ND	ND	ND	ND	1.12 (112.17-120.67)	6817.91 (151.00-176.67)

Note: T_o : onset temperature; T_p : peak gelatinization temperature; T_c : conclusion temperature; ND : not detected

[a]Amylose-lipid complex type I; [b]Amylose-lipid complex type II

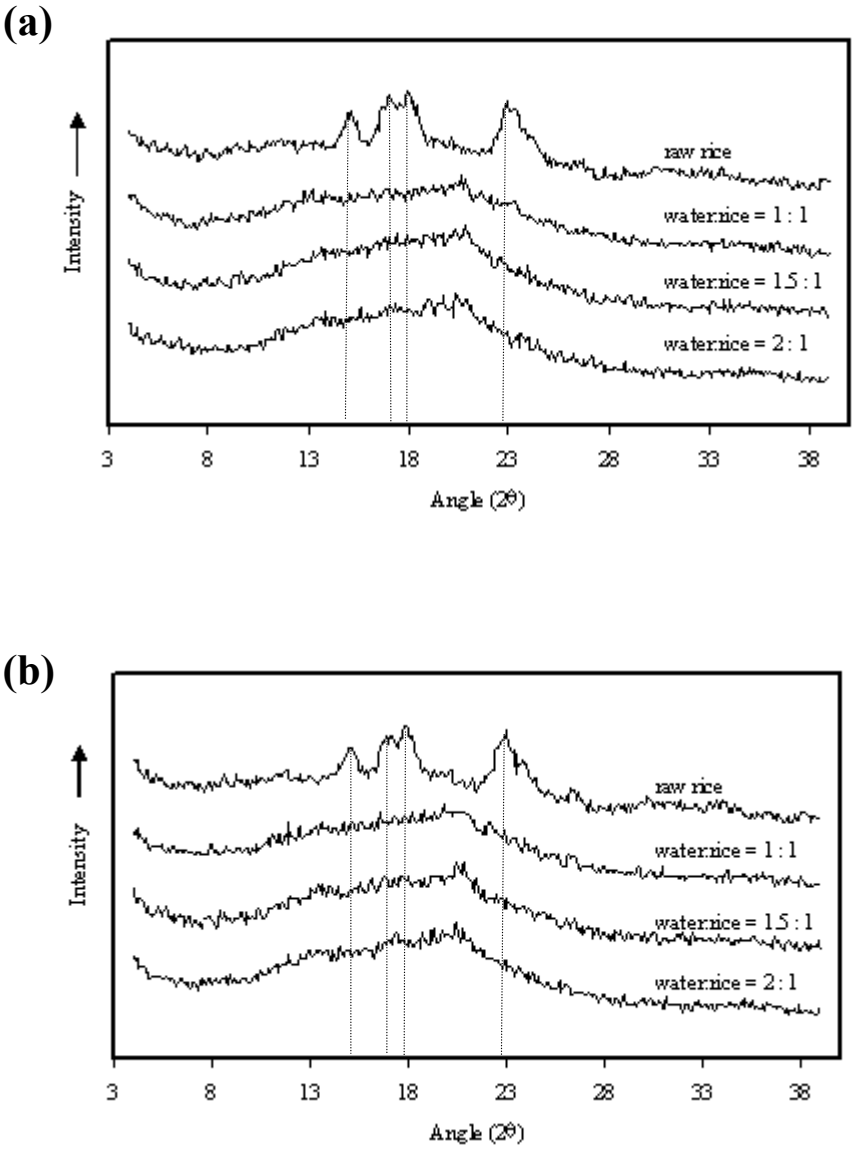
ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ในข้าวสุกโดยวิธีการใช้ความร้อนพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีแหล่งปลูกและระดับอัตราส่วนน้ำแตกต่างกัน โดยหลอดรังสีเอกซ์นี้ใช้ คอปเปอร์เป็นแหล่งผลิตรังสี และกำหนดค่ามุมของการหักเห (2θ) อยู่ในช่วง 4.00-38.97° พิจารณาจากการเปลี่ยนรูปแบบผลึกจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในข้าวดิบ (Iturriaga *et al*., 2004; Zobel, 1964) ภายหลังการทำให้ข้าวสุกโดยเกิดเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์แล้วนั้น จะพบโครงสร้าง แบบอสัณฐาน (amorphous) โดยไม่ปรากฏพีคที่พบในโครงสร้างผลึกของข้าวดิบ (Chen and Jane, 1994) จากการทดลองพบว่าข้าวสุกด้วยการใช้ความร้อนในทุกระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวจาก 3 แหล่ง

ปลูกที่แตกต่างกัน มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในข้าวดิบ ซึ่งให้พีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน ดังภาพที่ 13 ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกแบบ A เป็นแบบอสัณฐานเกิดจากการหลอมส่วนที่เป็นผลึกทั้งหมดของแป้งในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Slade, 1984) แต่อย่างไรก็ตามการปรากฏพีคเล็กที่ประมาณ 20°2θ แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V (V-type) ร่วมอยู่ด้วย เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (Hibi *et al*., 1990; Sandeep *et al*., 1994; Zobel, 1964) การเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกสอดคล้องกับผลการตรวจสอบการเจลาติไนซ์ของข้าวสุกโดยวิธีการใช้ความร้อนพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีแหล่งปลูกและระดับอัตราส่วนน้ำแตกต่างกันด้วย DSC ซึ่งไม่พบค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์ของแป้ง แต่พบเฉพาะค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันอยู่ในช่วง 106-122°ซ และ 148-180°ซ (ตารางที่ 11) โดยสอดคล้องกับการทดลองของ Hibi และคณะ (1993) ซึ่งรายงานว่าข้าวเจ้าที่ผ่านการทำให้สุกด้วยความร้อนแล้วตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย XRD ให้โครงสร้างผลึกแบบ อสัณฐานและมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ร่วมอยู่ด้วยเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดสาร

ประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายในเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 สุกด้วย SEM จากภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยการใช้ความร้อนที่แต่ละระดับอัตราส่วนน้ำ จากการส่องภายใต้กล้อง SEM ที่กำลังขยาย 40 เท่า และค่าความต่างศักย์เท่ากับ 10 kV แสดงให้เห็นรอยแยกในส่วนของเนื้อเมล็ด ซึ่งไม่ปรากฏรอยแยกลักษณะดังกล่าวในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ดิบ และสังเกตเห็นรอยแยกเพิ่มมากขึ้นที่ระดับอัตราส่วนน้ำเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 14a, 14b และ 14c) รอยแยกดังกล่าวจึงแสดงถึงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับในขั้นตอนการหุงต้ม โดยมีทิศทางจากด้านท้องไปสู่ด้านตรงข้าม (Little and Dawson, 1960 อ้างโดย Juliano, 1985) และเมื่อ

เพิ่มกำลังขยายเป็น 5000 เท่า พบว่าเม็ดสตาร์ชในข้าวสุกด้วยความร้อนที่ระดับอัตราส่วนน้ำ 1 : 1 เกิดการพองตัวเต็มที่และแตกออกบางส่วนดังภาพที่ 14d และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

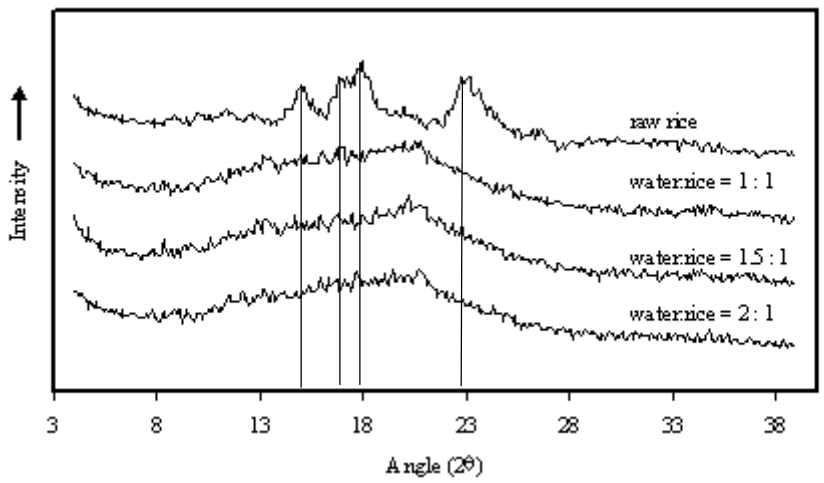


ภาพที่ 13 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่

อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที จากจังหวัดสุรินทร์ (a), จังหวัดขอนแก่น (b) และจังหวัดอำนาจเจริญ (c)

X-ray diffractograms of raw and cooked KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min from Surin province (a), Khonkean province (b) and Aumnadjarean province (c)

(c)

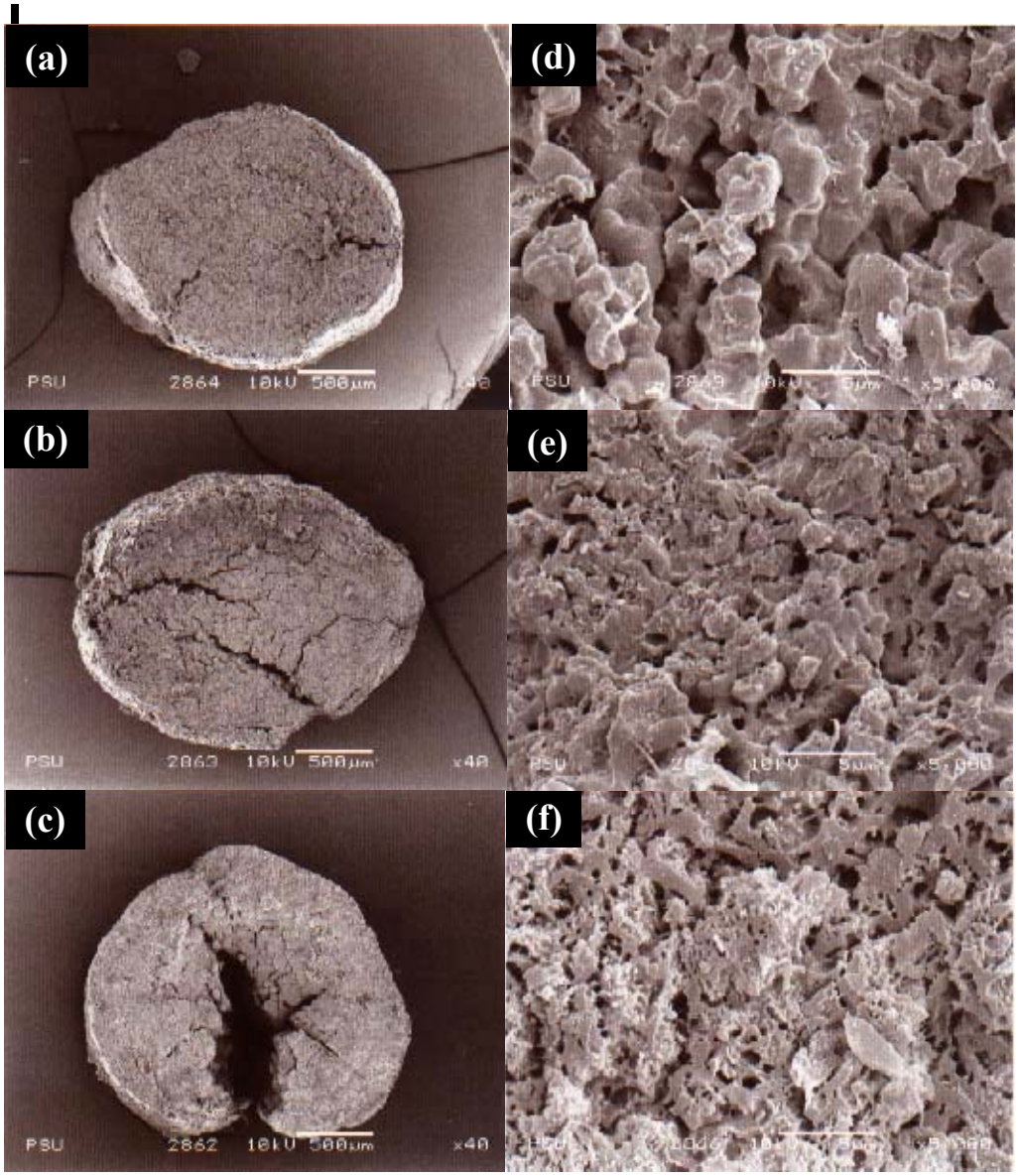


ภาพที่ 13 (ต่อ)

ในข้าวสุกด้วยความร้อนที่ระดับอัตราส่วนน้ำ 1.5 : 1 และ 2 : 1 (ภาพที่ 14e และ 14f) โดยเปลี่ยนแปลงจากลักษณะหลายเหลี่ยมเรียงตัวกันแน่นเปลี่ยนเป็นลักษณะร่างแห สอดคล้องกับรายงานการทดลองของ Sanders (1996) รายงานว่าเม็ดสตาร์ชที่มีการดูดซึมน้ำเข้ามามากจะเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ (birefringence) เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนแอลงจากการที่พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวสุก ได้แก่ การเกิดเจลาติไนซ์โดยการวิเคราะห์ด้วย DSC และลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวัดค่าความแข็งโดยใช้ Texture analyzer ระหว่างแหล่งปลูกและระดับอัตราส่วนน้ำแตกต่างกัน พบว่าข้าวสุกโดยใช้ความร้อนที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 : 1 เกิดเจลาติไนซ์สมบูรณ์ เนื่องจากเทอร์โมแกรมของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่งไม่ปรากฏค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์ในทุกอัตราส่วนน้ำต่อข้าวที่ใช้ เปรียบเทียบกับข้าวดิบในแต่ละแหล่งที่แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ นอกจากนี้พบว่าแหล่งปลูกต่างกันมีผลให้ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสแตกต่างกัน (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 6) Juliano (1985) รายงานผลการทดสอบความชอบของผู้บริโภคในด้านเนื้อสัมผัสข้าวสุก พบว่าผู้บริโภคชอบรับประทานข้าวที่อ่อนนิ่ม ไม่มีลักษณะแฉะ จึงเลือกข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณอะมิโลสปานกลาง และพันธุ์ข้าวไทยที่ได้รับความนิยมมาก คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เพราะมีความหอมเฉพาะตัวที่โดดเด่น ประกอบกับให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี โดยค่าความแข็งเนื้อสัมผัสอยู่ในช่วง 6.5-7.5 กิโลกรัม หรือ

63.74-73.55 นิวตัน โดยใช้ Kramer shear press จากการทดลองพบว่าที่ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1.5 : 1



ภาพที่ 14 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที ที่อัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 1, 1.5 : 1 และ 2 :1 เมื่อส่องภายใต้กล้อง SEM ที่กำลังขยาย 40 เท่า (a),(b),(c) และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ชภายในเนื้อเมล็ดที่กำลังขยาย 5000 เท่า (d),(e),(f)

Cross section of cooked KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min with water-rice ratio 1 : 1, 1.5 : 1 and 2 : 1 observed by SEM (x40) (a),(b),(c) and starch granules within the endosperm cells (x5000) (d),(e),(f)

ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากทั้ง 3 แหล่งให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกดีที่สุด พิจารณาจากค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสที่อยู่ในช่วง 73.09-77.09 นิวตัน (ตารางที่ 10) ดังนั้นอัตราส่วนน้ำต่อข้าวที่เหมาะสมในการแปรรูปโดยการใช้ความร้อนเพื่อให้ข้าวสุกดีที่สุด คือ ที่ระดับ 1.5 : 1 และใช้ข้าวสุกในชุดการทดลองนี้เพื่อวิเคราะห์ชนิดสารที่ระเหยได้ต่อไป

จากการศึกษาชนิดสารที่ระเหยได้ในข้าวสุกโดยการใช้ความร้อนของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายแล้ววิเคราะห์ส่วนที่สกัดได้ด้วย GC-MS (ดังตารางภาคผนวกที่ 1) ได้โครมาโตแกรมของสารที่ระเหยได้ดังแสดงในภาพผนวกที่ 5 พบว่าสารที่ระเหยได้ในข้าวสุกจากแหล่งปลูกต่างกันนั้นไม่แตกต่างกัน โดยมีสารที่ระเหยได้ที่พบประมาณ 24 ชนิด ข้าวสุกจากจังหวัดสุรินทร์มีชนิดของสารที่ระเหยได้แตกต่างจากข้าวสุกอีก 2 แหล่งโดยมีสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ 1-undecene, 3,3,6-trimethyldecane, 2,6,7-trimethyldecane และ 2,6,10,19,23-pentamethyl-2,6,10,14,18,22-tetracohexaene สารในกลุ่มแอลกอฮอล์ ได้แก่ 2-butoxy-ethanol และ 2-ethyl-1-hexanol สารฟีนอลิก คือ 2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol และสารคาร์บอนิล คือ n-decenal ที่ไม่พบในข้าวสุกจากอีก 2 แหล่ง (ตารางที่ 12) ส่วนข้าวสุกจากอำนาจเจริญเท่านั้นที่พบ hexadecanoic acid (ภาพผนวกที่ 5c, peak 22) เมื่อพิจารณาชนิดสารที่ระเหยได้ในข้าวสุกด้วยการใช้ความร้อนของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน พบ 2AP เช่นเดียวกันกับที่พบในข้าวดิบ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Yoshihashi และคณะ (2002b) รายงานว่า 2AP ในข้าวหอมมะลิ 105 ไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนหรือเกิดขึ้นจากกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว แต่ถูกสร้างขึ้นในส่วนยอดของลำต้นข้าวในระหว่างการเพาะปลูก จึงพบสารนี้ทั้งในข้าวดิบและข้าวสุก สอดคล้องกับรายงานของ Buttery และคณะ (1982) ซึ่งพบว่า 2AP เป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นข้าวหอมสุกและมีคล้ายกลิ่นข้าวโพดคั่ว เมื่อพิจารณาถึงค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของสารให้กลิ่นรสแต่ละชนิดต่อค่า T โดยแสดงในรูป odor unit พบว่าสารที่ระเหยได้หลักที่ให้กลิ่นรสในข้าวหอมหุงสุกประกอบด้วย 2AP, (E,E)-2,4-decadienal, nonanal, hexanal, (E)-2-nonenal, octanal, decanal, 4-vinyl-guaiacol และ 4-vinylphenol (Buttery *et al.,* 1988)

ตารางที่ 12 สารที่ระเหยได้ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาทีจากแหล่งปลูกต่างกัน

Volatile compounds in cooked KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min from different sources

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
Hydrocarbons						
4-methylnonane	8.04	971	142	ND	4.56	3.71
3-methylnonane	8.33	978	142	5.95	4.03	3.67
n-decane	9.25	1001	142	20.08	27.32	20.95
3,3-dimethyloctane	10.00	1023	142	3.11	4.26	3.69
1-undecene	12.64	1100	154	4.13	ND	ND
n-undecane	11.17,12.65	1057, 1100	156	ND	5.09, 6.00	4.88, 7.76
n-tridecene	16.10	1199	184	1.37	1.69	1.69
3,3,6-trimethyldecane	19.61	1304	184	6.08	ND	ND
2,6,7-trimethyldecane	23.61	1430	184	1.74	ND	ND
1-tetradecene	23.90	1440	196	ND	2.67	1.42
1-hexadecene	28.37	1592	224	2.63	1.30	1.92
trans-2-nonadecene	34.79	1833	266	2.20	2.11	2.24
2,6,10,14-tetramethylpenta-decane	37.95	1963	268	1.39	1.33	1.02
2,6,10,19,23-pentamethyl-2,6,10,14,18,22-tetraco-hexaene	55.60	3563	396	7.36	ND	ND

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column; [c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.; ND : not detected

ตารางที่ 12 (ต่อ)

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
Alcohols						
2-butoxyethanol	5.22	902	118	4.86	ND	ND
2-ethyl-1-hexanol	8.76	989	130	4.78	ND	ND
1-undecanol	15.82	1191	172	1.89	2.59	2.42
1-heptadecanol	34.78	1833	256	2.18	2.79	2.64
Aldehydes and Ketones						
n-hexanal	4.10	816	100	2.59	2.76	5.45
n-nonanal	12.90	1107	142	1.81	3.15	5.14
n-decenal	11.22	1058	156	2.88	ND	ND
Aromatics						
toluene	3.97	806	92	1.67	1.75	2.75
o-xylene	5.75	915	106	ND	4.61	4.80
Acids and Esters						
hexadecanoic acid	39.17	2014	270	ND	ND	0.98
1,2-benzenedicarboxylic acid bis (2-methylpropyl) ester	53.89	3016	278	8.13	4.78	2.23

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ND : not detected

ตารางที่ 12 (ต่อ)

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
1,2-benzenedicarboxylic acid bis (2-methylhexyl) ester	55.60	3563	390	ND	6.17	5.30
Phenolic Compounds						
phenol	6.25	927	94	3.60	2.64	4.02
3-(1,1-dimethylethyl) phenol	19.61	1304	150	ND	1.76	2.72
2,4-bis(1,1-dimethylethyl) phenol	22.44	1392	206	ND	3.45	4.48
2,6-bis (1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol	26.24	1518	220	5.62	ND	ND
Nitrogen Compounds						
2-acetyl-1-pyrroline	7.04	947	111	3.96	3.17	4.12

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

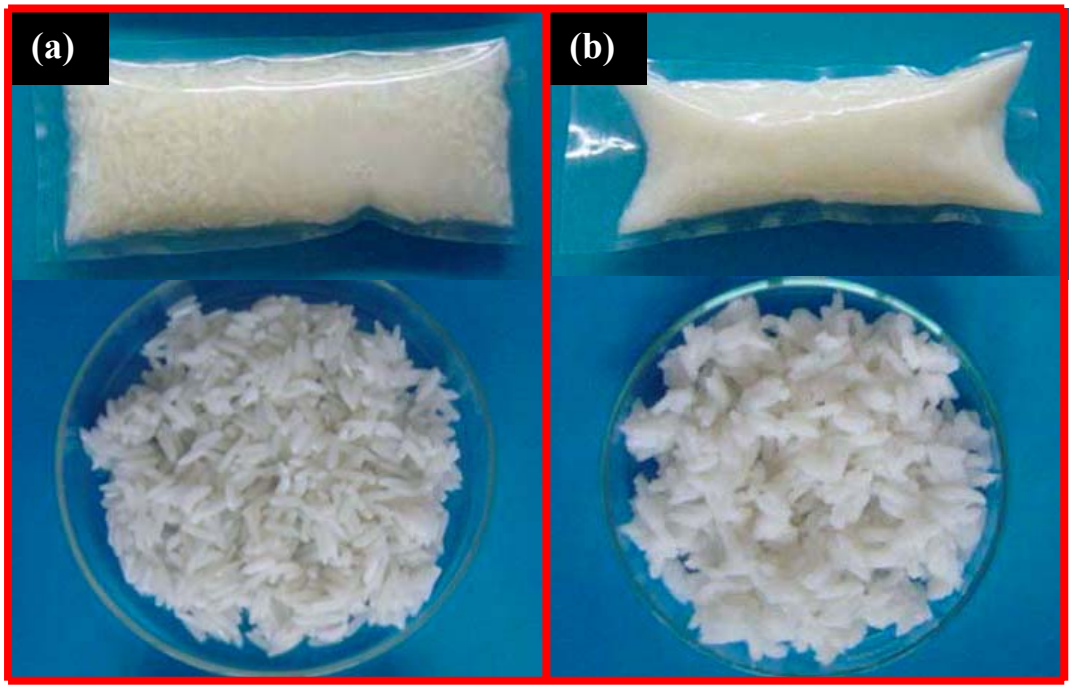
ND : not detected

2.2 ผลของการใช้ความดันสูง

นำข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแต่ละแหล่งมาแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และบรรจุลงในถุงไนลอนขนาด 5x10 เซนติเมตร น้ำหนักบรรจุ 75 กรัมต่อถุง โดยอัตราส่วนน้ำหนักน้ำต่อข้าวที่ใช้เท่ากับ 1 : 2 นำไปให้ความดัน 3 ระดับ คือ 600, 700 และ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30, 45 และ 60 นาที แล้วนำมาทดสอบการสุกเบื้องต้นของเมล็ด โดยการกดเมล็ดข้าวระหว่างกระจกนาฬิกา 2 อัน พบว่าข้าวในทุกสภาวะที่กล่าวข้างต้นมีลักษณะกึ่งดิบกึ่งสุก โดยยังมีผงขาวขุ่นปรากฏในส่วนของใจกลางเมล็ด และเมื่อตัดเมล็ดข้าวตามขวางจะพบสีขาวขุ่นตรงใจกลางเมล็ด การใช้ระดับความดันเพิ่มขึ้นมีผลให้มีผงขาวขุ่นปรากฏในส่วนของ ใจกลางเมล็ดลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้ระดับความดันสูงถึง 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 60 นาที ก็ยังไม่สามารถทำให้ข้าวเกิดการสุกได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นจึงให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้งข้าว โดยกำหนดอุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปให้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที และนำมาทดสอบการสุกเบื้องต้นของเมล็ด พบว่าในส่วนใจกลางเมล็ดไม่มีผงขาวขุ่น แสดงว่าการใช้ความร้อนร่วมกับความดัน สามารถทำให้ข้าวสุกได้โดยสมบูรณ์ โดยลักษณะเมล็ดข้าวภายหลังการให้ความร้อนเบื้องต้นและผ่านการให้ความดันแสดงดังภาพที่ 15 และหลังจากนำมาวิเคราะห์คุณภาพของข้าวสุก
ได้ผลดังนี้

คุณภาพของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิจาก 3 แหล่งที่วิเคราะห์ภายหลังการแปรรูปโดยให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับความดันสูง ได้แก่ อัตราการยืดตัวของเมล็ด และความแข็งของเนื้อสัมผัส พบว่าข้าวสุกจากแหล่งปลูกแตกต่างกันมีค่าอัตราการยืดตัวของเมล็ดแตกต่างกัน(p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 9) โดยค่าเฉลี่ยอัตราการยืดตัวของเมล็ดของข้าวสุกโดยให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับความดันสูงจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับ 1.14, 1.17 และ 1.18 ตามลำดับ จากการทดลองของ Ahromrit และคณะ (2006) ศึกษาผลของการใช้ความดันสูงร่วมกับความร้อนต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของเมล็ดข้าวเหนียวพันธุ์ไทย โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำหนักข้าวต่อน้ำที่ใช้เท่ากับ 1 : 5 ใช้ความดันที่ระดับ 100-600 เมกกะปาสคาล โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ใช้อยู่ในช่วง 20-70°ซ และ 5-120 นาที ตามลำดับ พบว่าเมล็ดข้าวเหนียวที่ผ่านการให้ความดันสูงที่ระดับความดันและอุณหภูมิต่างๆ มีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเมล็ดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการให้ความดันเพิ่มขึ้น การยืดตัวของเมล็ดเกิดจากการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและรอยแยกที่เกิดจากการแทรกผ่านของน้ำ และที่ระดับความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Watanabe และ

คณะ (1991) พบว่าเมล็ดข้าวสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากที่ระดับความดันสูงกว่า 400 เมกกะปาสคาล มีผลให้เกิดการ



ภาพที่ 15 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที (a)
และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที (b)
KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min (a) and KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min (b)

เปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเกิดการแตกออกของผนังเซลล์ในเมล็ด ส่วนค่าความแข็งของเนื้อ
สัมผัสภายหลังการทำสุกข้าวด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับความดันสูง พบว่าความแข็งของเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันแม้ใช้ข้าวจากแหล่งปลูกต่างกัน (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 9) โดยมีค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสอยู่ในช่วง 75.28-76.35 นิวตัน (ตารางที่ 13)

ผลการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จาก 3 แหล่งที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที พบว่าข้าวหลังการแปรรูปตามสภาวะดังกล่าวจากทั้ง 3 แหล่ง

ยังคงมีกิจกรรมของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนส โดยแหล่งปลูกไม่มีผลต่อกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนส (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 8) อย่างไรก็ตามกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสในข้าวสุกดังกล่าวมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสในข้าวดิบจากแหล่งเดียวกัน โดยข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และ

ตารางที่ 13 คุณภาพของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที

Grain qualities of cooked KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min

Source	Elongation ratio	Moisture content (%)	Hardness (N)
Surin province	1.18 ± 0.00^{c}	64.47 ± 0.06^{b}	75.45 ± 0.49^{ns}
Khonkean province	1.14 ± 0.00^{a}	65.64 ± 0.46^{c}	75.28 ± 1.68^{ns}
Aumnadjarean province	1.17 ± 0.01^{b}	63.72 ± 0.10^{a}	76.35 ± 0.68^{ns}

Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.

The different superscripts in the same column denote the significant differences (p<0.05).

^{ns} not significant at (p>0.05)

อำนาจเจริญมีกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสเท่ากับ 17.66, 20.38 และ 21.29 หน่วยต่อมิลลิกรัมโปรตีน ตามลำดับ (ตารางที่ 14) คิดเป็นร้อยละ 35.21, 29.53และ 34.98 เปรียบเทียบกับกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสในข้าวดิบจากแต่ละแหล่ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นและการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูง พบว่าแหล่งปลูกต่างกันมีผลให้ปริมาณความชื้นแตกต่างกัน (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 9) โดยปริมาณความชื้นเฉลี่ยของข้าวสุกจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับร้อยละ 64.47, 65.64 และ 63.72 ตามลำดับ ซึ่งข้าวสุกจากจังหวัดขอนแก่นมีค่าเฉลี่ยของปริมาณความชื้นสูงที่สุด (ตารางที่ 13)

จากการวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนซ์ด้วย DSC ของข้าวสุกจากการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันสูงที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล นาน 30 นาที ในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 3 แหล่ง พิจารณาจากเทอร์โมแกรมซึ่งในข้าวดิบ โดยทั่วไป

แล้วจะพบพีคของการเจลาติไนซ์ของแป้งปรากฏให้เห็นอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 63-78.4°ซ มีค่าพลังงานในการเจลาติไนซ์อยู่ในช่วงระหว่าง 11.3-17.3 จูลต่อกรัม และจะไม่พบพีคของการเจลาติไนซ์ของแป้งในตัวอย่างที่เกิดเจลาติไนซ์แล้ว (Russell and Juliano, 1983 อ้างโดย Juliano, 1985) จากการทดลองพบว่าเทอร์โมแกรมของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่งปรากฏค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์ (ภาพที่

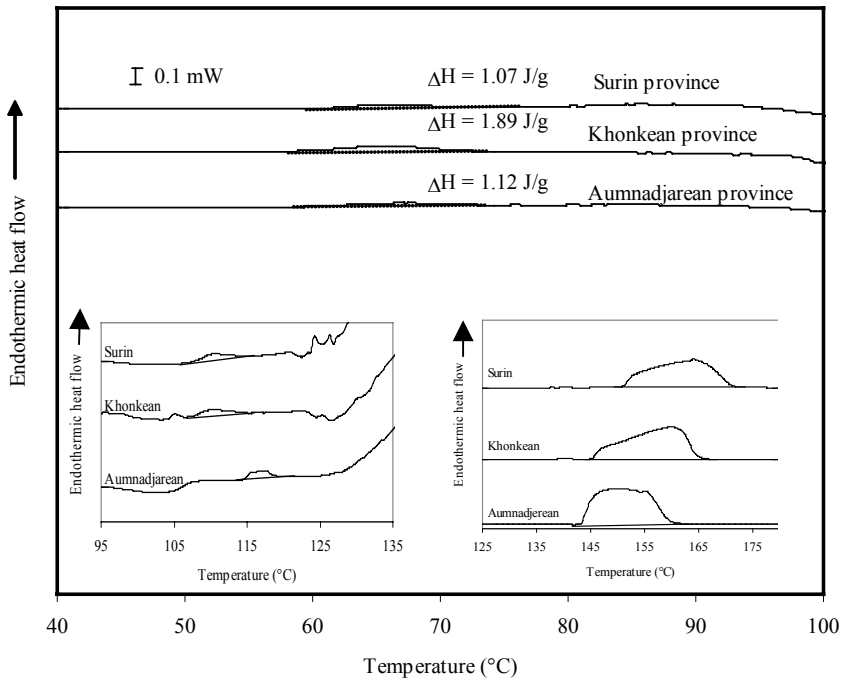
ตารางที่ 14 กิจกรรมและกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกจากแหล่งปลูกต่างกันที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15
นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที
Total LOX activity and specific LOX activity of cooked KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min from different sources

Source	Total LOX activity (unit/ml)	Total protein (mg/ml)	Specific LOX activity (unit/mg protein)
Surin province	6.70 ± 2.38^{ns}	0.38 ± 0.01^{c}	17.66 ± 1.12^{ns}
Khonkean province	6.38 ± 4.58^{ns}	0.31 ± 0.01^{a}	20.38 ± 1.49^{ns}
Aumnadjarean province	7.44 ± 2.29^{ns}	0.35 ± 0.01^{b}	21.29 ± 0.96^{ns}

Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.
The different superscripts in the same column denote the significant differences (p<0.05).
^{ns} not significant at (p>0.05)

16) โดยช่วงอุณหภูมิ (T_o-T_c) และค่าพลังงานในการเจลาติไนซ์ของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญ มีค่าเท่ากับ 60.34-70.80, 59.22-72.25, 60.70-71.04°ซ และ 1.07, 1.89, 1.12 จูลต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 15) ซึ่งอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ (T_o) ของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงจากทั้ง 3 แหล่งมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ในข้าวดิบจากแหล่งเดียวกัน (63.9, 62.15 และ 63.09°ซ) และช่วงระยะเวลาของการเกิดเจลาติไนซ์ในข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับ 10.46, 13.03 และ 10.34 ตามลำดับ มีช่วงระยะเวลาสั้นกว่าช่วงระยะเวลาการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.08, 16.27 และ 14.45 ตามลำดับ สอดคล้องกับการทดลองของ Blaszczak และคณะ (2005) ซึ่งศึกษาผลของการใช้ความ

ดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแป้งมันฝรั่ง โดยใช้แป้งละลายในน้ำที่มากเกินพอ (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) และให้ความดันที่ระดับ 600 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 2 และ 3 นาที ที่อุณหภูมิ 20°ซ พบว่าแป้งที่ผ่านการให้ความดันที่ 2 และ 3 นาที มี T_o-T_c และค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์เท่ากับ 57.47-71.00°ซ, 5.55 จูลต่อกรัม และ 58.79-72.57°ซ, 4.31จูลต่อกรัม ตามลำดับ โดยมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันฝรั่งดิบ ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์



ภาพที่ 16 เทอร์โมแกรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกจากแหล่งปลูกต่างกันที่ผ่านการให้ความ

ร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที

Differential scanning calorimetry thermograms cooked KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min from different sources

เท่ากับ 65.04-77.17°ซ และ 15.96 จูลต่อกรัม อย่างไรก็ตามพบว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงมีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวดิบแต่ละแหล่ง (10.59, 12.76 และ 11.01 จูลต่อกรัม)

คิดเป็นร้อยละ 10, 15 และ 10 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวดิบแต่ละแหล่ง และเทอร์โมแกรมของข้าวขาวดอกมะลิ105 ดิบและสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันจากทั้ง 3 แหล่ง แสดงพีคของพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันทั้ง 2 ชนิด (Biliaderis *et al*., 1986b; Biliaderis and Galloway, 1989; Biliaderis and Seneviratne, 1990; Donovan *et al*., 1983; Galloway *et al*., 1989; Kugimiya *et al*., 1980) ซึ่งช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและ

ตารางที่ 15 ช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60 °ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที จากแหล่งปลูกต่างกัน

Gelatinization temperature range and enthalpy of raw and cooked KDML 105 milled rice preheated at 60 °C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min from different sources

Source	Gelatinization temperature (°C)			Enthalpy (ΔH)(J/g)	Enthalpy (ΔH)(J/g) (Melting temperature (T_o-T_c) (°C))	
	T_o	T_p	T_c		complex I[a]	complex II[b]
Surin province						
raw rice	63.69	69.17	74.77	10.59	2.16 (114.50-120.50)	5822.63 (144.17-160.00)
cooked rice	60.34	66.83	70.80	1.07	2.45 (106.17-117.83)	6838.81 (149.00-177.67)
Khonkean province						
raw rice	62.15	69.00	78.42	12.76	1.33 (106.33-116.17)	7599.10 (149.00-180.00)
cooked rice	59.22	65.67	72.25	1.89	1.58 (106.67-117.67)	6962.65 (143.00-172.00)
Aumnadjarean province						
raw rice	63.09	69.50	77.54	11.01	1.38 (107.33-117.83)	4980.02 (150.67-176.33)
cooked rice	60.70	67.00	71.04	1.12	1.49 (103.50-114.83)	6102.67 (142.17-169.17)

Note: T_o : onset temperature; T_p : peak gelatinization temperature; T_c : conclusion temperature; ND : not detected

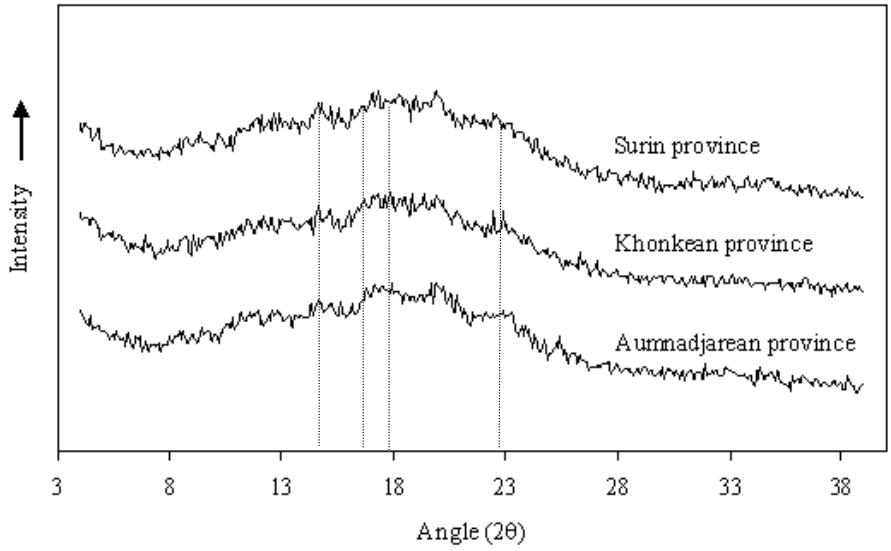
[a]Amylose-lipid complex type I

[b]Amylose-lipid complex type II

ไขมันของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่งปลูกมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วง 103-117°ซ และ 142-177°ซ และค่าพลังงานอยู่ในช่วง 1.58-2.54 และ 6102-6962 จูลต่อกรัม ตามลำดับ (ตาราง
ที่ 15)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้ XRD มีหลอดรังสีเอกซ์นี้ใช้คอปเปอร์เป็น
แหล่งผลิตรังสีและกำหนดค่ามุมของการหักเห (2θ) อยู่ในช่วง 4.00-38.97° พิจารณาจากการเปลี่ยนรูปแบบผลึกจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในข้าวดิบ (Iturriaga *et al*., 2004; Zobel, 1964) ภายหลังการทำให้ข้าวสุกโดยเกิดเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์แล้วนั้น จะพบโครงสร้าง แบบอสัณฐาน (amorphous) โดยไม่ปรากฏพีคที่พบในโครงสร้างผลึกของข้าวดิบ (Chen and Jane, 1994) จากการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันสูงที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล ในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 3 แหล่งปลูกต่างกัน มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างผลึกแตกต่างกับข้าวสุกโดยการใช้ความร้อน โดยยังมีพีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ ที่แสดงรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ A ปรากฏอยู่ ดังภาพที่ 17 และจากการคำนวณปริมาณผลึกโดยใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่พีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ ต่อพื้นที่ทั้งหมด เริ่มจากพีคที่ 15.2 ถึง 22.9°2θ พบว่าปริมาณผลึกของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับร้อยละ 8.94, 9.34 และ 8.58 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม พบว่าปริมาณผลึกของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงมีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของข้าวดิบแต่ละแหล่ง (ร้อยละ 38.33, 37.53 และ 39.82) คิดเป็นร้อยละ 23, 25 และ 22 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของข้าวดิบแต่ละแหล่ง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลโดยใช้ DSC เพื่อศึกษาผลการเจลาติไนซ์ในตัวอย่างข้าวดังกล่าว พบว่าเทอร์โมแกรมของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากทั้ง 3 แหล่งปลูก ปรากฏค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์ แสดงให้เห็นว่าการเกิดเจลาติไนซ์ยังไม่เกิดโดยสมบูรณ์ ยังมีผลึกบางส่วนที่ยังไม่เกิดการเจลาติไนซ์ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงมีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวดิบแต่ละแหล่ง (10.59, 12.76 และ 11.01 จูลต่อกรัม) คิดเป็นร้อยละ 10, 15 และ 10 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการทดลองของ Douzals และคณะ (1996) ซึ่งรายงานว่าน้ำแป้งสาลีเข้มข้นร้อยละ 30 ที่ผ่านการใช้ความดันที่ระดับ 600 เมกกะปาสคาล ที่อุณหภูมิ 25°ซ นาน 15 นาที เกิดการเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์ เมื่อทดสอบโดยการย้อมสี

ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยเม็ดสตาร์ชที่เกิดการเจลาติไนซ์แล้วจะไม่เกิดสีกับสารละลายไอโอดีน แต่จากการทดลองของ Katapo และคณะ (2002) ซึ่งศึกษาผลการใช้ความดันสูงต่อการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกด้วย XRD ในแป้งข้าวที่ระดับความดัน 690 เมกกะปาสคาลที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาทีและ 1 ชั่วโมง พบว่าแป้งข้าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกจากแบบ A เปลี่ยนเป็นแบบ B ร่วมกับโครงสร้างผลึกแบบ V โดยเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน ซึ่งปรากฏพีคที่ 8, 13 และ20°2θ เช่นเดียวกันกับจากการทดลองของ Hibi และคณะ (1993) ที่พบว่าแป้งข้าวหลังผ่านการให้ความดันระดับ 500 เมกกะปาสคาล เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกจากแบบ A เป็นแบบ B บางส่วน



ภาพที่ 17 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกจากแหล่งปลูกต่างกันที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที

X-ray diffractograms of cooked KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min from different sources

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภายในเมล็ดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

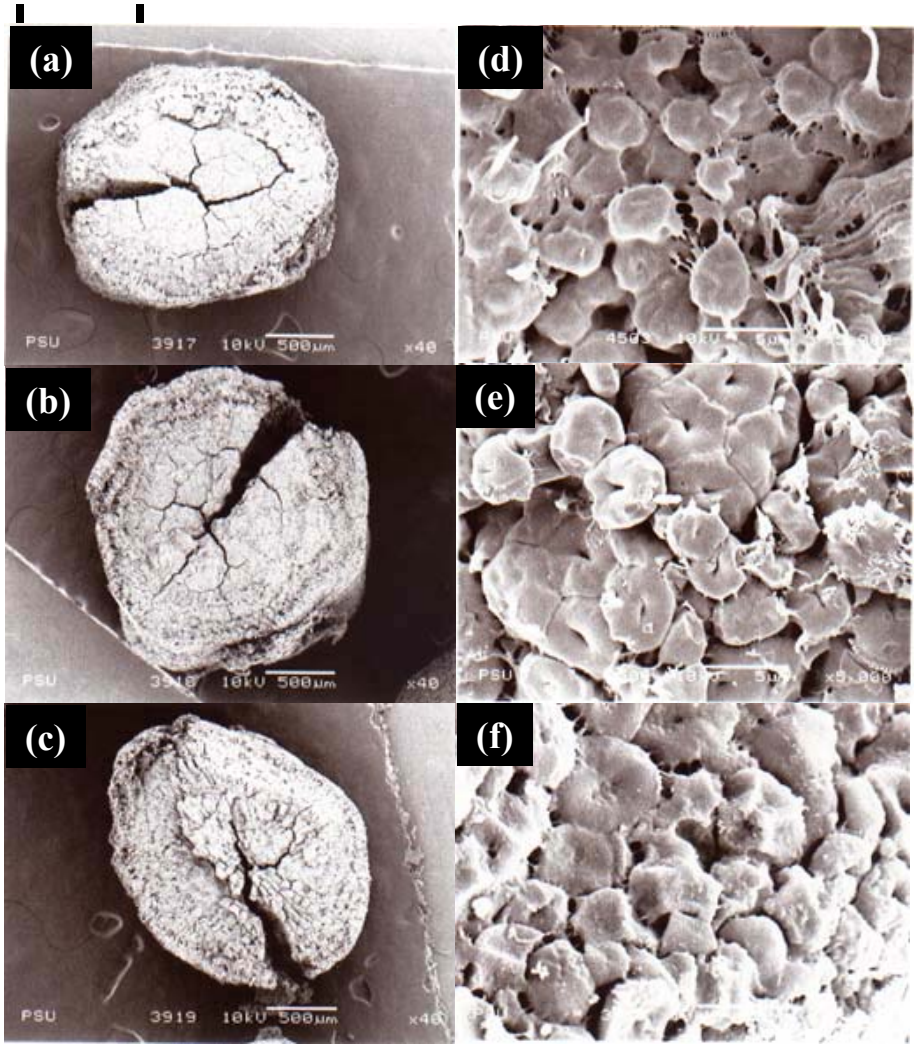
สุกจาก 3 แหล่งที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที เมื่อส่องภายใต้กล้อง SEM ที่กำลังขยาย 40 เท่า พบรอยแยกในส่วนของเนื้อเมล็ดในลักษณะใกล้เคียงกันของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่ง (ภาพที่ 18a,

18b และ 18c) ซึ่งรอยแยกดังกล่าวแสดงถึงปริมาณน้ำที่เมล็ดข้าวดูดซับในขั้นตอนการทำให้สุกด้วยความร้อนร่วมกับความดัน โดยมีทิศทางจากด้านท้องไปสู่ด้านตรงข้าม (Little and Dawson, 1960 อ้างโดย Juliano, 1985) และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5000 เท่า พบว่าเม็ดสตาร์ชในข้าวสุกจากแต่ละแหล่งปลูกเกิดการพองตัวเต็มที่และแตกออกบางส่วน (ภาพที่ 18d, 18e และ 18f) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างผลึกและผลการเจลาติไนซ์ในตัวอย่างข้าวสุกดังกล่าวจากการวิเคราะห์ด้วย XRD และ DSC ตามลำดับ โดยพบว่าข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 3 แหล่งปลูกต่างกัน ยังมีพีคที่แสดงรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ A ปรากฏอยู่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลึกของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูง พบว่ามีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของข้าวดิบแต่ละแหล่ง (ร้อยละ 38.33, 37.53 และ 39.82) คิดเป็นร้อยละ 23, 25 และ 22 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของข้าวดิบแต่ละแหล่ง อีกทั้งเทอร์โมแกรมของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่ง ยังมีพีค เจลาติไนซ์ของแป้งปรากฏอยู่ แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงมีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวดิบแต่ละแหล่ง (10.59, 12.76 และ 11.01 จูลต่อกรัม) คิดเป็นร้อยละ 10,

15 และ 10 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวสุก ได้แก่ การเกิดเจลาติไนซ์โดยการวิเคราะห์ด้วย DSC และลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวัดค่าความแข็งโดยใช้ Texture analyzer ของข้าวสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเทอร์โมแกรมของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่ง ยังมีเพียงพีคขนาดเล็กปรากฏในช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าโครงสร้างผลึกของข้าวสุกดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับชุดการทดลองที่ใช้ความร้อนทำให้ข้าวสุก อย่างไรก็ตามพบว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์มีค่าน้อยมากเปรียบเทียบกับข้าวดิบ ส่วนค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุกที่ได้จากการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงจากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีค่าเท่ากับ 75.45, 75.28 และ 76.35 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุกที่ได้รับการยอมรับของผู้บริโภค (63.74-73.55 นิวตัน) (Juliano, 1985) ดังนั้นการทำให้ข้าวสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาทีร่วมกับการใช้ความดันสูงที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม ให้คุณภาพข้าวสุกที่ดีที่สุดและใช้ข้าวสุกในชุดการทดลองนี้เพื่อวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารที่ระเหย

ได้ต่อไป



ภาพที่ 18 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที จากจังหวัดสุรินทร์, จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดอำนาจเจริญ เมื่อส่องภายใต้กล้อง SEM ที่กำลังขยาย 40 เท่า (a),(b),(c) และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ชภายในเนื้อเมล็ดที่กำลังขยาย 5000 เท่า (d),(e),(f)

Cross section and starch granules of cooked KDML 105 milled rice preheated at 60°C

for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min from Surin province, Khonkean province and Aumnadjarean province observed by SEM (x40) (a),(b),(c) and starch granules within the endosperm cells (x5000) (d),(e),(f)

จากการศึกษาสารระเหยในข้าวสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูงของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายแล้ววิเคราะห์ส่วนที่สกัดได้ด้วย GC-MS (ดังตารางภาคผนวกที่ 1) ได้โครมาโตแกรมของสารที่ระเหยได้ดังแสดงในภาพผนวกที่ 6 พบว่าชนิดสารที่ระเหยได้ในข้าวสุกจากแหล่งปลูกต่างกันนั้นไม่แตกต่างกัน โดยมีสารที่ระเหยได้ที่พบประมาณ 24 ชนิด ข้าวสุกจากจังหวัดสุรินทร์มีชนิดของสารที่ระเหยได้แตกต่างจากข้าวสุกอีก 2 แหล่งโดยมีสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ 1-undecene, 3,3,6-trimethyl-decane, 2,6,10,19,23-pentamethyl-2,6,10,14,18,22-tetracohexaene สารในกลุ่มแอลกอฮอล์ ได้แก่ 2-butoxyethanol และ 2-ethyl-1-hexanol สารฟีนอลิก คือ 3-(1,1-dimethylethyl) phenol และ 2,6-bis (1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol ที่ไม่พบในข้าวสุกจากอีก 2 แหล่ง ขณะที่ข้าวสุกจากจังหวัดขอนแก่น และอำนาจเจริญมีชนิดของสารที่ระเหยได้ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 16) เมื่อพิจารณาชนิดสารที่ระเหยได้ในข้าวสุกด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน พบว่ามีชนิดของสารที่ระเหยได้ไม่แตกต่างกับข้าวสุกด้วยการใช้ความร้อน

ตารางที่ 16 สารที่ระเหยได้ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที จากแหล่งปลูกต่างกัน

Volatile compounds in cooked KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min fromdifferent sources

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
Hydrocarbons						
4-methylnonane	8.44	981	142	ND	7.98	3.03
3-methylnonane	9.33	1003	142	2.85	2.30	2.68
n-decane	9.97	1022	142	39.00	37.19	44.08
3,3-dimethyloctane	10.80	1046	142	11.00	6.55	5.24
1-undecene	13.64	1129	154	13.39	ND	ND
n-undecane	11.87	1077	156	ND	10.55	16.83
n-tridecene	17.30	1235	184	0.72	1.33	0.99
3,3,6-trimethyldecane	20.12	1320	184	1.37	ND	ND
1-tetradecene	23.10	1413	196	ND	5.00	1.12
1-hexadecene	29.37	1628	224	1.20	1.38	1.39
trans-2-nonadecene	34.79	1833	266	1.34	1.67	1.31
2,6,10,14-tetramethyl-pentadecane	38.60	1990	268	1.47	2.20	1.27

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ND : not detected

ตารางที่ 16 (ต่อ)

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
2,6,10,19,23-pentamethyl-2,6,10,14,18,22-tetracohexaene	54.53	3070	396	2.34	ND	ND
Alcohols						
2-butoxyethanol	6.22	927	118	6.52	ND	ND
2-ethyl-1-hexanol	8.78	989	130	4.73	ND	ND
1-undecanol	16.86	1222	172	2.60	2.12	1.14
1-heptadecanol	34.78	1833	256	1.18	0.99	0.95
Aldehydes and Ketones						
n-hexanal	4.57	854	100	0.86	1.23	0.46
n-nonanal	13.79	1133	142	0.90	1.52	8.44
Aromatics						
o-xylene	6.25	927	106	ND	4.20	4.27
Acids and Esters						
1,2-benzenedicarboxylic acid bis (2-methylpropyl) ester	53.89	3016	278	2.20	2.40	1.64
1,2-benzenedicarboxylic acid bis (2-methylhexyl) ester	55.60	3563	390	ND	6.35	1.79

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ND : not detected

ตารางที่ 16 (ต่อ)

Compound	RT[a]	RI[b]	MW	Relative peak area (%)[c]		
				Surin province	Khonkean province	Aumnadjarean province
Phenolic Compounds						
phenol	6.76	940	94	1.15	1.82	0.51
3-(1,1-dimethylethyl) phenol	22.61	1398	150	1.19	ND	ND
2,4-bis(1,1-dimethylethyl) phenol	27.11	1548	206	ND	1.26	1.92
2,6-bis (1,1-dimethylethyl)-4-methyl-phenol	27.04	1545	220	2.67	ND	ND
Nitrogen Compounds						
2-acetyl-1-pyrroline	7.74	964	111	1.32	1.96	0.94

Note: [a] Retention Time; [b] Retention Index : calculated according to the retention time of n-alkanes standard on RTX-5 column;

[c] Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ND : not detected

3. ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

จากการทดลองในตอนที่ 2 เรื่องผลของการใช้ความร้อนและการใช้ความดันสูงต่อการสุกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้พิจารณาเลือกตัวแทนข้าวสารจำนวน 1 แหล่งจากจังหวัดอำนาจเจริญ เพื่อนำมาศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพเมล็ดและกลิ่นรสในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยพิจารณาเลือกจากคุณภาพของข้าวสุก ได้แก่ การเกิดเจลาติไนซ์โดยการวิเคราะห์ด้วย DSC ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวัดค่าความแข็งโดยใช้ Texture analyzer ของข้าวสุกจากการใช้ความร้อนในการทดลองข้อ 2.1 และข้าวสุกจากการใช้ความดันสูงในการทดลองข้อ 2.2 และค่า Relative peak area (%) ของสารหลักที่ให้กลิ่นรสในข้าวหอม คือ 2AP ซึ่งพบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จาก 3 แหล่ง คือ จังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญที่ผ่านการทำให้สุกด้วยความร้อนโดยใช้ระดับอัตราส่วนน้ำต่อข้าวที่แตกต่างกันเกิดเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์ โดยเทอร์โมแกรมของข้าวสุกไม่ปรากฏพีคในช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง เช่นเดียวกันกับการทำให้ข้าวสุกด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันสูง แม้ว่าเทอร์โมแกรมของข้าวสุกจากทั้ง 3 แหล่งยังคงมีพีคขนาดเล็กปรากฏในช่วงอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของแป้ง แต่อย่างไรก็ตามค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวดิบ นอกจากนี้พบว่าแหล่งปลูกต่างกันไม่มีผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสแตกต่างกัน และจากการพิจารณาค่า Relative peak area (%) ของ 2AP แล้วพบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกจากจังหวัดอำนาจเจริญมีค่า Relative peak area (%) มากที่สุด จึงนำข้าวสารจากแหล่งดังกล่าวมาบรรจุในถุงไนลอนในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศและเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 20°ซ และอุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ตลอดช่วงการเก็บรักษานาน 12 เดือน และสุ่มตัวอย่างข้าวสารจากแต่ละสภาวะเมื่อผ่านการเก็บรักษานาน 3, 6, 9 และ 12 เดือน ตามลำดับ นำมาทำให้สุกด้วย 2 วิธี คือ (1) การใช้ความร้อนโดยวิธีการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1.5 : 1 และ (2) การให้ความร้อนร่วมกับความดัน โดยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 2 แล้ววิเคราะห์คุณภาพเมล็ดข้าวสุกพบว่าได้ผลดังนี้

จากการวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ดข้าวสุก ได้แก่ อัตราการยืดตัวของเมล็ด และเนื้อสัมผัสในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดอำนาจเจริญที่เก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน โดยนำมาทำให้สุกโดยการใช้ความร้อนด้วยวิธีนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที กำหนดอัตราส่วนน้ำหนักน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1.5 : 1 พบว่าอุณหภูมิ และสภาพการบรรจุข้าวสารในระหว่างเก็บรักษาที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (p>0.05) แต่ระยะเวลา

ตารางที่ 17 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระหว่างเก็บรักษาโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที

Changes in grain qualities of KDML 105 milled rice during storage steamed at 100°C for 30 min

Storage condition	Storage (months)	Elongation ratio	Hardness (N)	Moisture content (%)
Fresh rice	0	1.49 ± 0.01^{b}	76.86 ± 0.27^{ab}	62.72 ± 0.14^{e}
Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag	3	1.47 ± 0.01^{ab}	79.01 ± 0.33^{efg}	60.02 ± 0.12^{a}
	6	1.47 ± 0.01^{ab}	79.44 ± 0.38^{g}	59.88 ± 0.75^{a}
	9	1.48 ± 0.01^{ab}	78.95 ± 0.18^{efg}	60.00 ± 0.28^{a}
	12	1.48 ± 0.01^{ab}	79.20 ± 0.19^{fg}	60.04 ± 0.20^{a}
Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag + vacuum	3	1.46 ± 0.01^{a}	78.70 ± 0.39^{defg}	61.00 ± 0.58^{bc}
	6	1.47 ± 0.01^{ab}	79.08 ± 0.21^{efg}	60.18 ± 0.36^{a}
	9	1.47 ± 0.01^{ab}	78.02 ± 0.21^{cde}	60.34 ± 0.12^{ab}
	12	1.48 ± 0.01^{ab}	78.63 ± 0.27^{defg}	60.26 ± 0.31^{a}
20°C + nylon bag	3	1.47 ± 0.01^{ab}	78.42 ± 0.81^{defg}	61.59 ± 0.31^{cd}
	6	1.47 ± 0.01^{ab}	78.30 ± 0.35^{cdef}	60.94 ± 0.57^{bc}
	9	1.47 ± 0.01^{ab}	78.02 ± 0.14^{cde}	61.43 ± 0.39^{cd}
	12	1.47 ± 0.01^{ab}	77.82 ± 0.29^{bcd}	60.54 ± 0.09^{ab}
20°C + nylon bag + vacuum	3	1.46 ± 0.01^{a}	77.25 ± 0.18^{abc}	61.99 ± 0.46^{d}
	6	1.46 ± 0.01^{a}	77.73 ± 0.46^{abcd}	61.34 ± 0.38^{cd}
	9	1.47 ± 0.01^{ab}	76.79 ± 1.39^{ab}	61.70 ± 0.15^{d}
	12	1.47 ± 0.01^{ab}	76.75 ± 1.35^{a}	61.31 ± 0.18^{cd}

Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.

The different superscripts in the column denote the significant differences ($p<0.05$).

การเก็บรักษาที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก ($p<0.05$) (ตารางภาคผนวกที่ 10) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 17 พบว่าข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20°ซ และอุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) เป็นระยะเวลานาน 3 เดือน และ 3, 6 เดือน

มีอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกเฉลี่ยเท่ากับ 1.46 ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเปรียบเทียบกับอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกใหม่ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสารและระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราการยืดตัวของเมล็ด (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 10)

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุกภายหลังการเก็บรักษาข้าวสารในสภาวะแตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิ สภาพการบรรจุ และระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุก (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 11) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 17 พบว่าข้าวสารที่เก็บรักษานาน 12 เดือนที่อุณหภูมิห้อง (28-32 °ซ) มีค่าความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวสารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 °ซ โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็งของข้าวสุกเท่ากับ 79.20, 78.63 นิวตัน และ 77.82, 76.75 นิวตัน ตามลำดับ สอดคล้องกับการทดลองของ Meullenet และคณะ (2000) ซึ่งศึกษาผลการเก็บรักษาข้าวเปลือกที่อุณหภูมิแตกต่างกันต่อลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 38 °ซ มีค่าความแข็งของข้าวสุกเพิ่มสูงขึ้นกว่าข้าวที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 21 °ซ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันและโปรตีนที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาข้าวดิบ โดยปริมาณโปรตีนมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงสุก คือ เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น มีผลให้ระยะเวลาในการหุงสุกนานขึ้น เนื่องจากโปรตีนเป็นตัวขัดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเมล็ดข้าว และโปรตีนยังมีความสัมพันธ์กับการดูดซึมน้ำของเมล็ด ทำให้เมล็ดดูดซึมน้ำได้น้อยลง ข้าวสุกมีความนุ่มและเหนียวลดลง (Juliano *et al*., 1965) และกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลส และสารไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันแล้วสลายตัวต่อไปได้เป็นสารคาร์บอนิลที่สามารถเร่งการเกิดออกซิเดชันของโปรตีน (เกิดพันธะไดซัลไฟด์จากหมู่ซัลไฮดริล) ซึ่งส่งผลเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเมล็ดและยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่แข็งขึ้น (Moritaka and Yasumatsu, 1972) และที่อุณหภูมิการเก็บเดียวกัน ข้าวสารที่เก็บรักษานาน 12 เดือนที่อุณหภูมิห้อง (28-32 °ซ) ในสภาพบรรยากาศปกติมีค่าความแข็งของข้าวสุก (79.20 นิวตัน) สูงกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศ (78.63 นิวตัน) เช่นเดียวกับข้าวสารที่เก็บรักษานาน 12 เดือน ที่อุณหภูมิ 20 °ซ ในสภาพบรรยากาศปกติมีค่าความแข็งของข้าวสุก (77.82 นิวตัน) สูงกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศ (76.75 นิวตัน) (p<0.05) (ตารางที่ 17) สอดคล้องกับรายงานของ Juliano (1985) ซึ่งรายงานว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศ มีค่าความแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่เก็บในสภาพดัดแปลงบรรยากาศและสภาพบรรยากาศปกติ ข้าวสารที่เก็บรักษาในภาชนะปิดสนิทในสภาพสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 30 °ซ นาน 3 เดือน มีค่าความแข็งของข้าวสุกเพิ่มสูงขึ้น (Yanai *et al*., 1979 อ้างโดย Zhout *et al*., 2002) อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการ

บรรจุข้าวสารและระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่า 2 ปัจจัยนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุก (p<0.05) โดยการเก็บข้าวสารที่อุณหภูมิ 20 °ซ เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศมีค่าความแข็งของข้าวสุกน้อยกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติ (p<0.05) แต่ข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20 °ซ มีค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุกไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการเก็บนาน 12 เดือน (p>0.05) (ตารางที่ 17) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุก (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 11)

ข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่เก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน นำมาทำให้สุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60 °ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำหนักน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 2 พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้นมีผลให้อัตราการยืดตัวของเมล็ดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (p <0.05) (ตารางที่ 18) ขณะที่อุณหภูมิ และสภาพการบรรจุข้าวสารที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าอัตราการ ยืดตัวของเมล็ด (p>0.05) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยไม่มีผลให้เกิดความแตกต่างของอัตราการยืดตัวของเมล็ด (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 12) ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุก พบว่าอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัส (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 13) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 18 พบว่าภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32 °ซ) มีค่าความแข็งของข้าวสุกมากกว่าข้าวสารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 °ซ โดยมีค่าเฉลี่ยความแข็ง

ของข้าวสุกเท่ากับ 77.31, 77.48 นิวตัน และ 74.59, 73.68 นิวตัน ตามลำดับ และภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือนที่อุณหภูมิ 20 °ซ พบว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติมีค่าความแข็งของข้าวสุกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ขณะที่ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศมีค่าความแข็งของข้าวสุกไม่แตกต่างจากข้าวสารเริ่มต้นหุงสุกด้วยวิธีเดียวกัน (p>0.05) อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการบรรจุข้าวสารและระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่า 2 ปัจจัยนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุก (p<0.05) ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทาง

เคมีของโปรตีนและผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาข้าวดิบ โดยในสภาวะที่มีออกซิเจนสามารถเร่งการเกิดออกซิเดชันของโปรตีน (เกิดพันธะไดซัลไฟด์จากหมู่ซัลไฮดริล)

ซึ่งส่งผลเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเมล็ดและยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่แข็งขึ้น (Moritaka and Yasumatsu, 1972) และการเกิดออกซิเดชันของ ferulate esters ในส่วนของเฮมิเซลลูโลส

ตารางที่ 18 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระหว่างเก็บรักษา โดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที

Changes in grain qualities of KDML 105 milled rice during storage preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min

Storage condition	Storage (months)	Elongation ratio	Hardness (N)	Moisture content (%)
Fresh rice	0	1.17 ± 0.01^{ns}	76.35 ± 0.68^{bc}	63.72 ± 0.10^{bc}
Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag	3	1.17 ± 0.01^{ns}	77.31 ± 0.82^{cde}	63.73 ± 0.10^{bc}
	6	1.17 ± 0.01^{ns}	77.99 ± 0.36^{e}	63.74 ± 0.18^{bc}
	9	1.18 ± 0.01^{ns}	77.97 ± 0.16^{de}	63.72 ± 0.02^{bc}
	12	1.18 ± 0.01^{ns}	77.48 ± 0.32^{de}	63.41 ± 0.08^{a}
Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag + vacuum	3	1.17 ± 0.01^{ns}	77.48 ± 0.72^{de}	63.82 ± 0.21^{cd}
	6	1.18 ± 0.01^{ns}	77.08 ± 0.11^{bcde}	63.70 ± 0.10^{bc}
	9	1.18 ± 0.01^{ns}	77.47 ± 0.33^{de}	63.73 ± 0.03^{bc}
	12	1.18 ± 0.01^{ns}	77.24 ± 0.07^{cde}	63.51 ± 0.06^{ab}
20°C + nylon bag	3	1.17 ± 0.01^{ns}	74.59 ± 0.62^{a}	64.43 ± 0.22^{f}
	6	1.17 ± 0.01^{ns}	74.57 ± 1.12^{a}	63.96 ± 0.10^{cd}
	9	1.17 ± 0.01^{ns}	77.08 ± 0.05^{bcde}	63.92 ± 0.06^{cd}
	12	1.17 ± 0.01^{ns}	76.95 ± 0.11^{bcd}	63.74 ± 0.08^{bc}
20°C + nylon bag + vacuum	3	1.17 ± 0.01^{ns}	73.68 ± 0.20^{a}	64.23 ± 0.28^{ef}
	6	1.17 ± 0.01^{ns}	73.86 ± 0.95^{a}	64.19 ± 0.15^{ef}
	9	1.17 ± 0.01^{ns}	76.20 ± 0.31^{b}	64.01 ± 0.07^{de}
	12	1.18 ± 0.01^{ns}	76.45 ± 0.11^{bc}	63.83 ± 0.13^{cd}

Note: Each value is the mean of triplicate $\pm$ SD.

The different superscripts in the column denote the significant differences ($p<0.05$).

[ns] not significant at (p>0.05)

ก่อให้เกิด cross-linking แก่ผนังเซลล์ของเมล็ดข้าวในระหว่างการเก็บรักษา (Mod *et al*., 1983) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลา ในการเก็บรักษา พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของเนื้อสัมผัสข้าวสุก (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 13)

จากการวิเคราะห์ค่าความชื้นของข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ภายหลังการเก็บรักษาข้าวสารในสภาวะที่แตกต่างกัน แล้วทำให้สุกโดยการใช้ความร้อน พบว่าอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในข้าวสุก (p<0.05) ภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32 ˚ซ) มีค่าความชื้นของข้าวสุกน้อยกว่าข้าวสารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 ˚ซ โดยมีค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวสุกเท่ากับร้อยละ 60.02, 61.00 และ 61.59, 61.99 ตามลำดับ (p<0.05) (ตารางที่ 17) อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่า 2 ปัจจัยนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในข้าวสุก (p<0.05) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 17 พบว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32 ˚ซ) มีค่าความชื้นลดลงเมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้น ขณะที่ค่าความชื้นของข้าวสารเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 ˚ซ ลดลงน้อยกว่าการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิห้อง (28-32 ˚ซ) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 14) โดยข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20 ˚ซ มีปริมาณความชื้นค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวสุกเมื่อผ่านการเก็บรักษานาน 3, 6, 9 และ 12 เดือน เท่ากับร้อยละ 77.25, 77.73, 76.79 และ 76.75 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นของข้าวสุกในข้าวสารเริ่มต้นซึ่งมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 76.87 สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวสุกในสภาวะการเก็บดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (28-32˚ซ) ยังคงมีค่าความชื้นลดลงเมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้น (p<0.05) (ตารางที่ 17)

ส่วนค่าความชื้นของข้าวสุกโดยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันในข้าวสารที่เก็บรักษาต่างสภาวะกัน พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในข้าวสุก (p<0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 15) เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 18 พบว่าข้าวสารที่เก็บรักษานาน 12 เดือนที่อุณหภูมิห้อง (28-32 ˚ซ) มีค่าความชื้นของข้าวสุกมากกว่าข้าวสารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 20 ˚ซ โดยมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 63.41, 63.51 และ 63.74, 63.83 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บ

รักษา พบว่า 2 ปัจจัยนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในข้าวสุก (p<0.05) โดยข้าวสารที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) มีค่าความชื้นของข้าวสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเก็บรักษาในระยะเวลานานขึ้น สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวสุกที่อุณหภูมิการเก็บดังกล่าว ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาในระยะเวลานานขึ้น (p<0.05) (ตารางที่ 18) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ สภาพการบรรจุข้าวสาร และระยะเวลาในการเก็บรักษา พบว่าทั้ง 3 ปัจจัยไม่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น (p>0.05) (ตารางภาคผนวกที่ 15) โดยข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 20°ซ ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศมีค่าความชื้นของข้าวสุกเพิ่มขึ้นภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน ซึ่งมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 64.43 และ 64.23 ตามลำดับ แต่ปริมาณความชื้นจะมีค่าคงที่ภายหลังการเก็บรักษานาน 6, 9 และ 12 เดือน แต่อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ในสภาพสุญญากาศช่วยรักษาปริมาณความชื้นของข้าวสุกให้มีค่าคงที่ โดยมีค่าความชื้นเฉลี่ยของข้าวสุกเมื่อผ่านการเก็บรักษานาน 3, 6, 9 และ 12 เดือน เท่ากับร้อยละ 63.82, 63.70, 63.73 และ 63.51 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นของข้าวสุกในข้าวสารเริ่มต้นซึ่งมีค่าความชื้นเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 63.72 (p>0.05) (ตารางที่ 18)

จากการตรวจสอบการเกิดเจลาติไนซ์ด้วย DSC ของข้าวสุกโดยวิธีการใช้ความร้อนแบบการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที ที่อัตราส่วนน้ำหนักน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1.5 : 1 จากข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกันทั้ง 4 สภาวะ ได้แก่ การบรรจุในถุงไนลอนในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 20°ซ และอุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ที่ผ่านการเก็บเป็นเวลา 3, 6, 9, 12 เดือน พิจารณาจากเทอร์โมแกรมซึ่งจะไม่พบพีคของการเจลาติไนซ์ของแป้ง (63-78.4°ซ) ในตัวอย่างที่เกิดเจลาติไนซ์โดยสมบูรณ์ (Russell and Juliano, 1983 อ้างโดย Juliano, 1985) จากการทดลองพบว่าเทอร์โมแกรมของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่ผ่านการเก็บในทุกสภาวะไม่แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง แสดงให้เห็นว่าข้าวสารจากแต่ละสภาวะการเก็บรักษาเกิดการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์โดยการทำให้สุกด้วยความร้อน และจากเทอร์โมแกรมจะสังเกตเห็นเฉพาะพีคของพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบ

เชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันเช่นเดียวกับข้าวสุกโดยวิธีการใช้ความร้อนก่อนเก็บรักษา (ภาพที่ 19a-19d) แม้ว่าช่วงอุณหภูมิในการสลายโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันในข้าวสุกด้วยการใช้ความร้อน เมื่อนำข้าวสารที่เก็บรักษาใน 4 สภาวะและที่ระยะเวลาการเก็บที่แตกต่างกันมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยอุณหภูมิการหลอมอยู่ในช่วง 102-125°ซ และ 134-180°ซ แต่จะพบว่าเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น ภายหลังจากนำข้าวสารในแต่ละสภาวะ

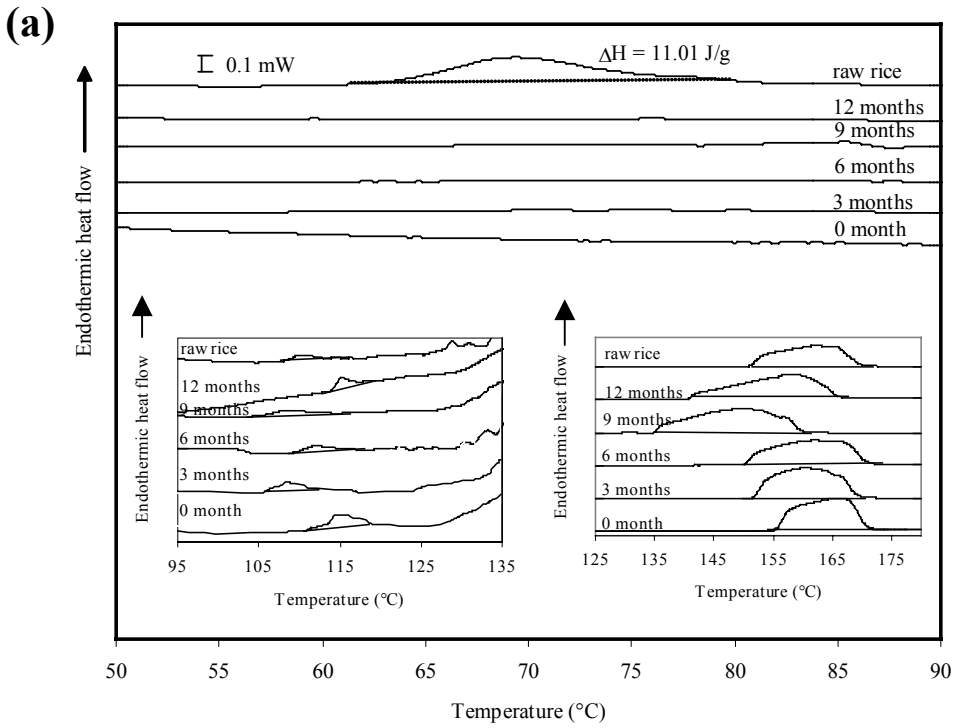
ของการเก็บมาทำให้สุกด้วยการใช้ความร้อน พบว่ามีแนวโน้มการใช้พลังงานในการสลายโครงสร้างสารประกอบ

เชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายหลังกระบวนการเก็บรักษาเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมัน โดยกรดไขมันอิสระที่เพิ่มสูงขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแล้วเกิดการรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลสเพิ่มมากขึ้น (Morrison, 1993; Morrison *et al*., 1993;

Moritaka and Yasumatsu, 1972) อย่างไรก็ตามพีคของสารประกอบเชิงซ้อนที่พบนั้นมาจากการเกิดรีโทรกราเดชันภายหลังการเกิดเจลาติไนซ์โดยโมเลกุลขนาดเล็กของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินจะกระจัดกระจายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่มีการเรียงตัวกันแน่น เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วย DSC จะสังเกตเห็นพีคของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยเช่นกัน (Smith, 1979; Brockington and Kelly, 1972 อ้างโดย Juliano, 1985) หรือกรดฟีนอลิกอิสระที่ถูกปลดปล่อยจากส่วนของผนังเซลล์ (ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวกล้องดิบมีค่าประมาณ 5.56 $\pm$ 0.17 μmol of gallic acid equivalent (GE)/g of grain โดยอยู่ในรูปของกรดฟีนอลิกอิสระประมาณ 0.7 $\pm$ 0.05 μmol/100 g of grain หรือคิดเป็นร้อยละ 38 ของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด) (Adom and Liu, 2002) สามารถต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันอิสระ มีผลให้กรดไขมันอิสระที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลสได้มากขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา (Mod *et al*., 1983) โดยข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) มีการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานมากที่สุด ดังภาพที่ 19a โดยข้าวสุกด้วยการใช้ความร้อนจากข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาวะดังกล่าวเป็นเวลา 0, 3, 6, 9 และ 12 เดือน มีค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1.38, 1.38, 2.17, 2.79, 2.43, 5.20 และ 4,980, 6,816, 7,159, 6,884, 7,593, 7,956 จูลต่อกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 19)

การตรวจสอบการเกิดเจลาติไนซ์ด้วย DSC ของข้าวสุกโดยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำหนักน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 2 จากข้าวสารภายหลังการเก็บในสภาวะต่างกันนาน 0, 3, 6, 9, 12 เดือน พบว่าเทอร์โมแกรมของข้าวสุกที่ได้จากการนำข้าวสารที่ผ่านการเก็บในทุกสภาวะปรากฏค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งและค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2 เปรียบเทียบกับเทอร์โมแกรมของข้าวดิบ (ภาพที่ 20a-20d) ข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารในทุกสภาวะการเก็บมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ (T_o) และอุณหภูมิเจลาติไนซ์ (T_p) เพิ่มสูงขึ้นเปรียบเทียบกับข้าวสุกโดย

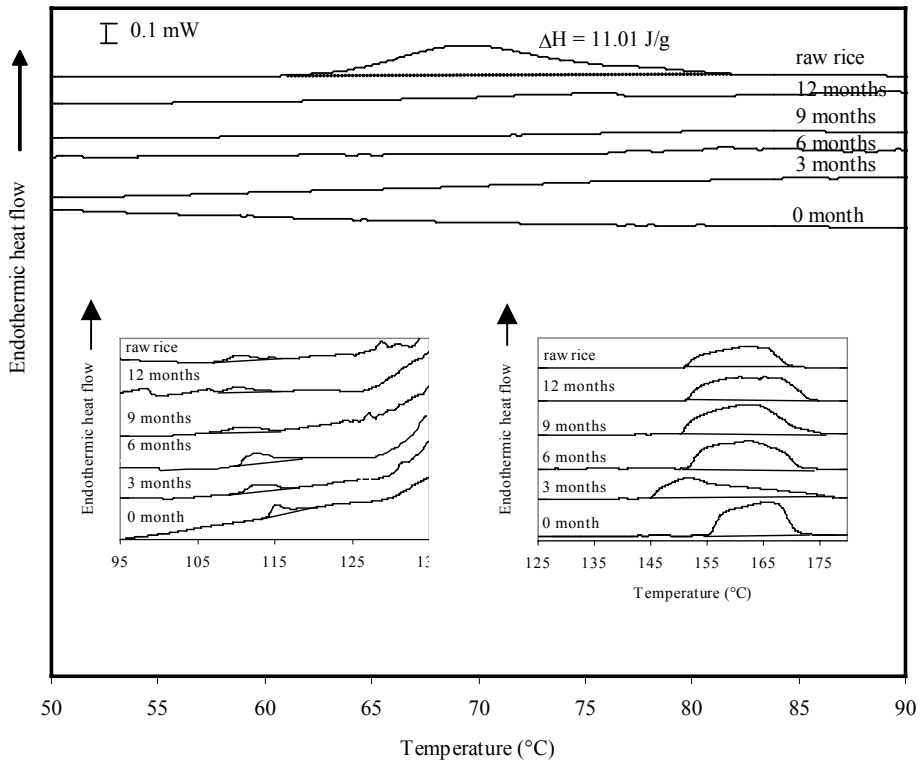
วิธีเดียวกันในเดือนที่ 0 และค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวสุกที่ได้จากข้าวสารที่ผ่านการเก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บเป็นเวลานานขึ้น (ตารางที่ 20) แต่อย่างไรก็ตามข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 20°ซ มีแนวโน้มของค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวสุกโดยการให้ความร้อนร่วมกับการใช้ความดันเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับข้าวสารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ซึ่งข้าวสารที่ผ่านการเก็บในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ภายหลังการเก็บรักษานาน 0, 3, 6, 9 และ 12 เดือน มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้นมากสุดเท่ากับ 1.12, 1.69, 2.88, 2.15 และ 2.69 จูลต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากความแข็งแรงของเนื้อเมล็ดเพิ่มขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงของไขมันและโปรตีนในระหว่างการเก็บรักษาข้าว ส่งผลต่อการยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้ง (Moritaka and Yasumatsu, 1972) ดังนั้นข้าวสุกด้วยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับความดันจึงต้องการพลังงานในการเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้น แต่ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20°ซ ภายหลังการทำให้สุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดัน มีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (1.04-1.48 จูลต่อกรัม) (ตารางที่ 20) สอดคล้องกับค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันของการเก็บรักษาที่สภาวะเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 20a โดยค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.38, 1.49, 1.80, 1.19, 2.54, 5.72 และ 4980, 6102, 6577, 6949, 7560, 7928 จูลต่อกรัม ตามลำดับ แต่ข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 20°ซ และข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ก็มีการเพิ่มของพลังงานที่ใช้ในช่วงการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนทั้ง 2 ชนิดเช่นเดียวกัน โดยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเดือนที่ 3 ของการเก็บรักษา และมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงของการเก็บนาน 6-12 เดือน แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการเก็บนานขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนของข้าวสารที่เก็บต่างกันใน 4 สภาวะ ภายหลังการนำมาทำให้สุกโดยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำให้ข้าวสุกด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันไม่มีผลให้เกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันภายหลังการเจลาติไนซ์จากการเกิดรีโทรกราเดชันของโมเลกุลขนาดเล็ก คือ อะมิโลสและอะมิโลเพกติน โดยช่วงอุณหภูมิการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ 1 และ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 103-127°ซ และ 142-180°ซ ตามลำดับ (ตารางที่ 20)



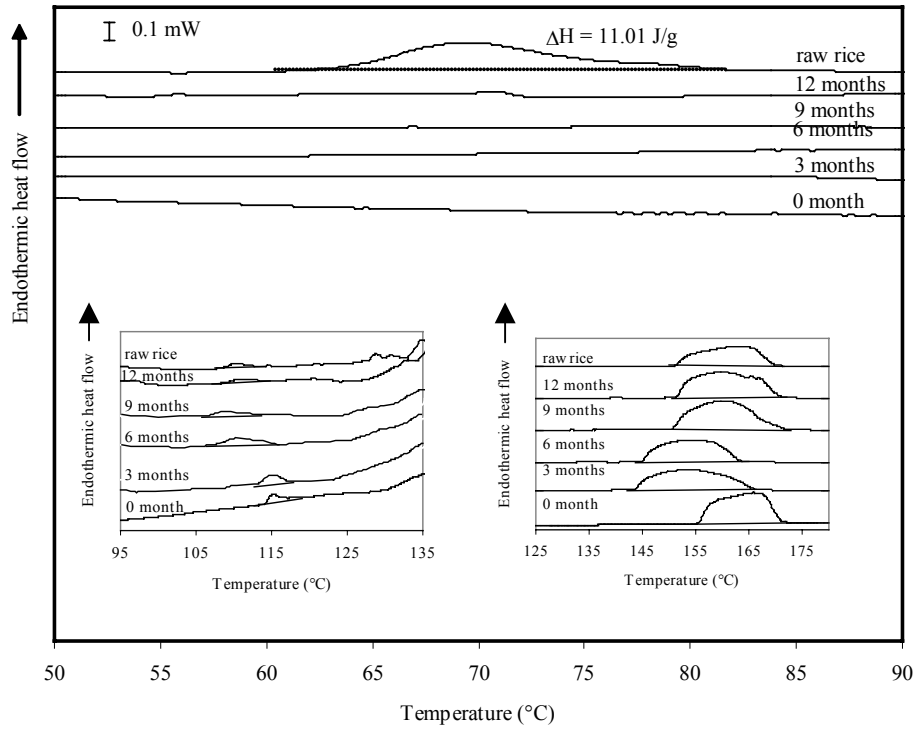
ภาพที่ 19 เทอร์โมแกรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที ในระหว่างเก็บรักษาภายใต้สภาวะ (a) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ), (b) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ), (c) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 20°ซ และ (d) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20°ซ

DSC thermograms of KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min during storage under (a) Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag, (b) Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag + vacuum, (c) 20°C + nylon bag and (d) 20°C + nylon bag + vacuum

(b)

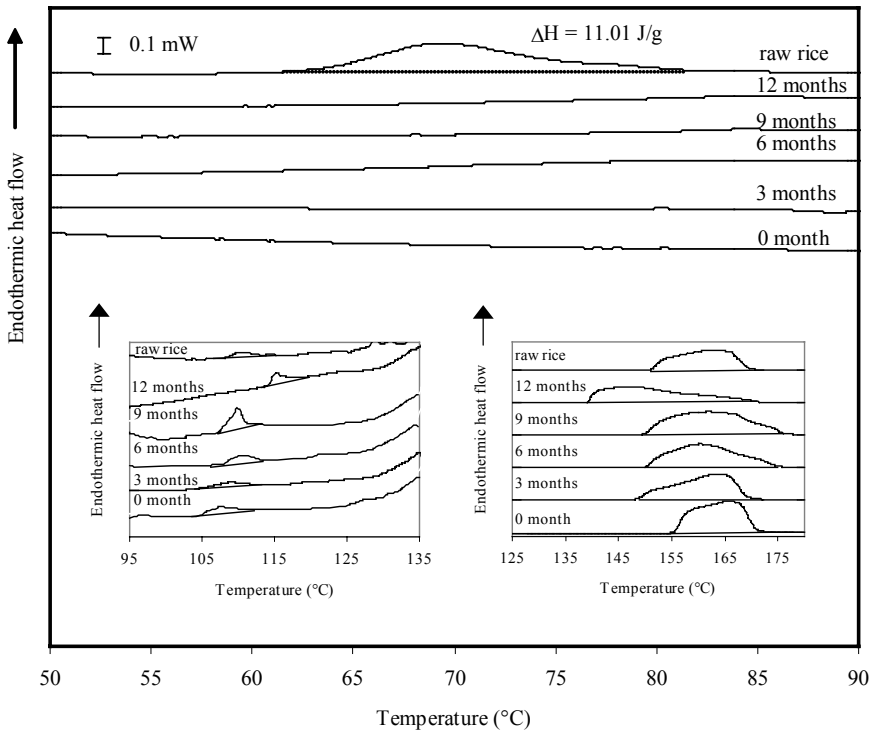

0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
Endothermic heat flow
50 55 60 65 70 75 80 85 90
Temperature (°C)
95 105 115 125
125 135 145 155 165 175
Temperature (°C)

(c)

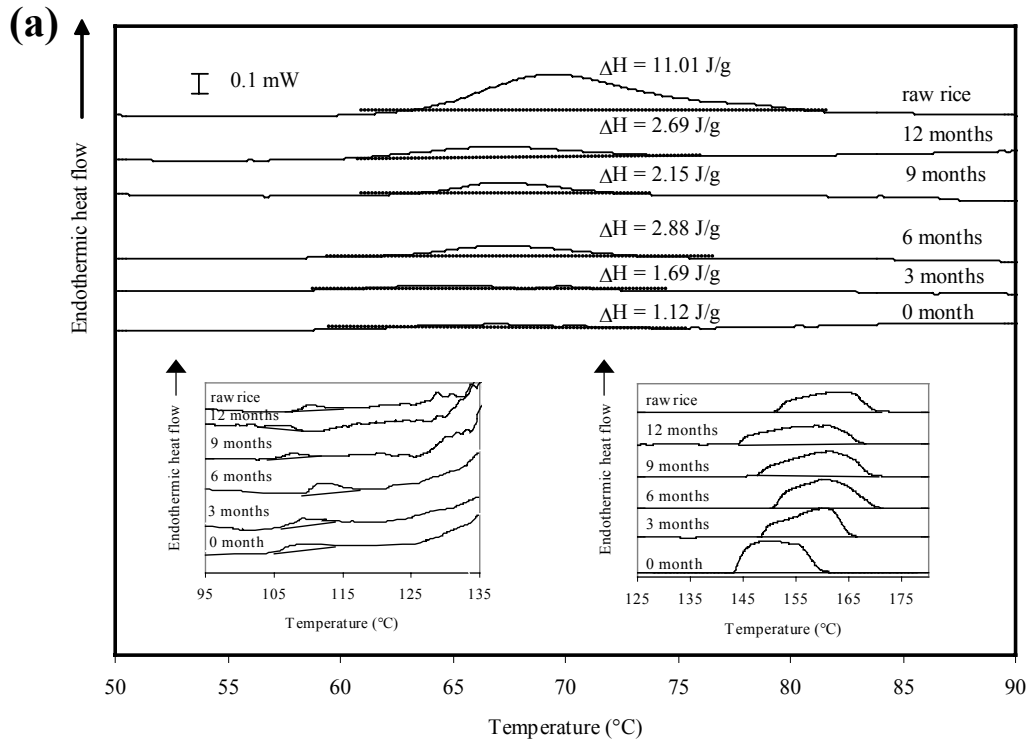

0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
Endothermic heat flow
50 55 60 65 70 75 80 85 90
Temperature (°C)
95 105 115 125 135
Temperature (°C)
125 135 145 155 165 175
Temperature (°C)

ภาพที่ 19 (ต่อ)

(d)


0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
Endothermic heat flow
50
55
60
65
70
75
80
85
90
Temperature (°C)
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
Endothermic heat flow
95
105
115
125
135
Temperature (°C)
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
Endothermic heat flow
125
135
145
155
165
175
Temperature (°C)

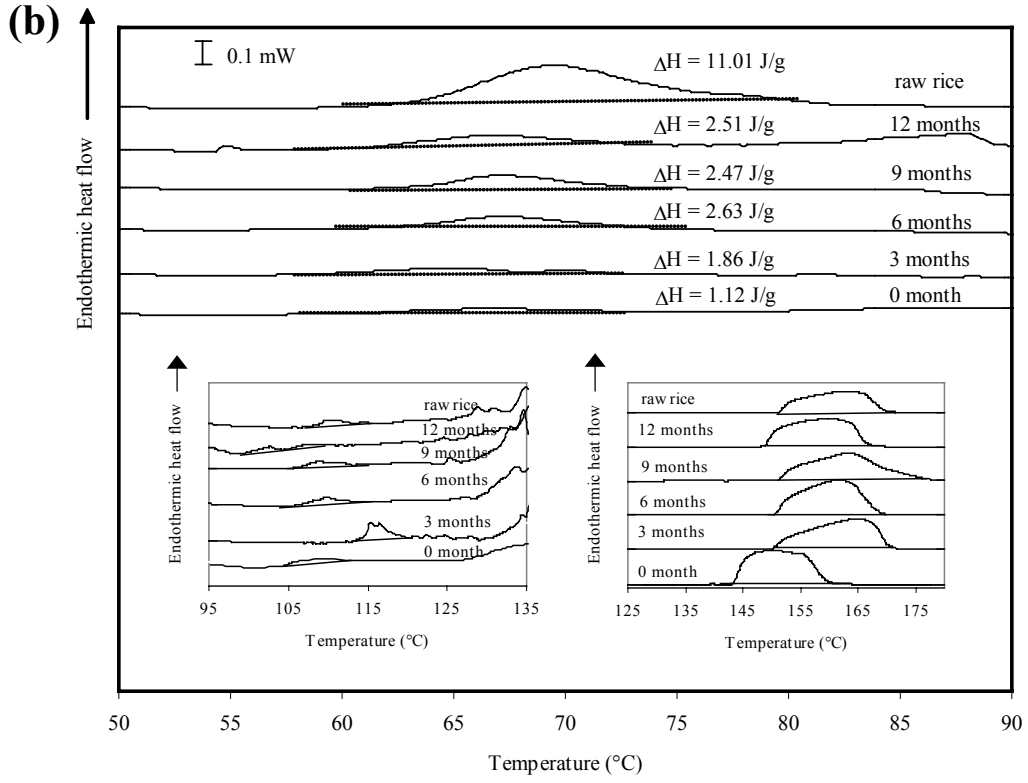
ภาพที่ 19 (ต่อ)

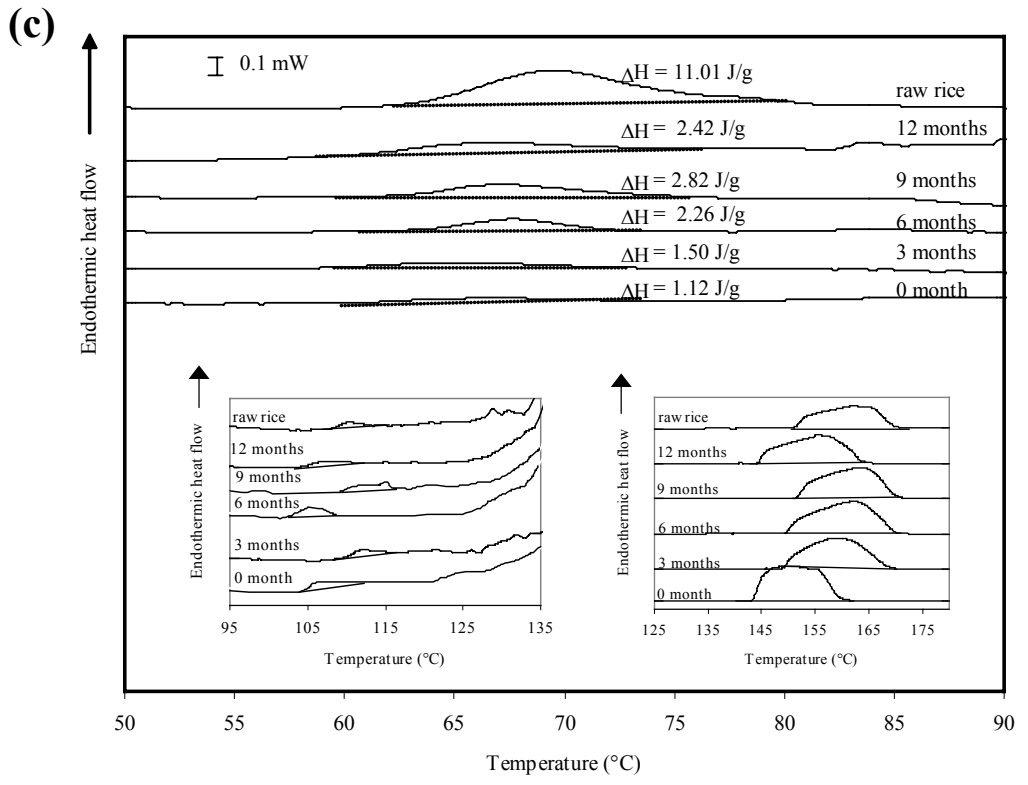


ภาพที่ 20 เทอร์โมแกรมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60 ˚ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างเก็บรักษาภายใต้สภาวะ (a) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32˚ซ), (b) ใน

สภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (28-32˚ซ), (c) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 20˚ซ และ (d) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20˚ซ

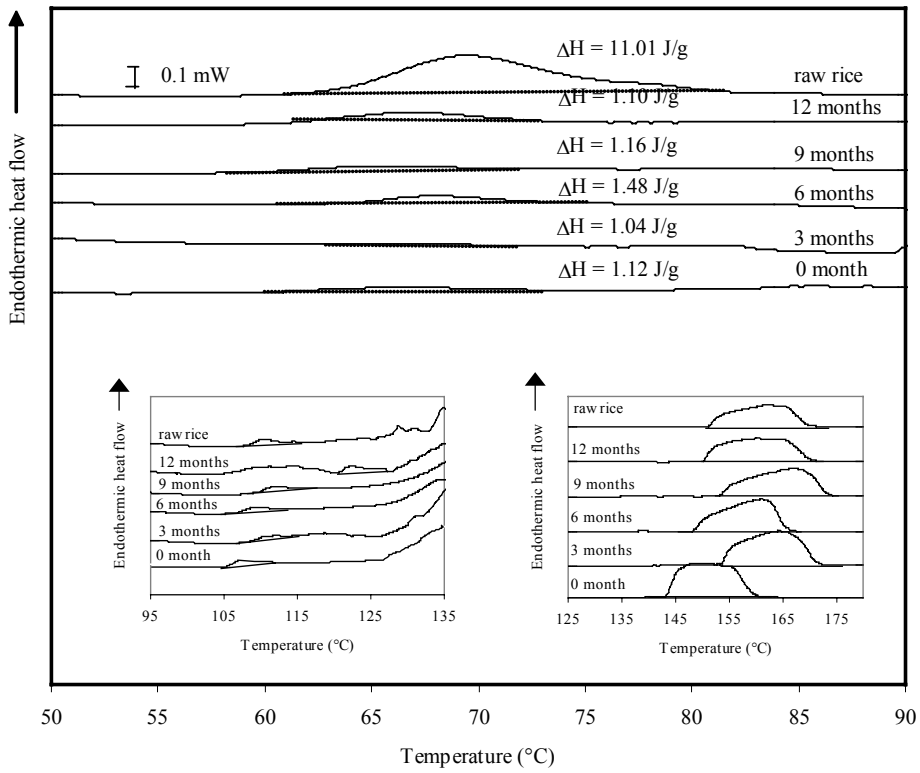
DSC thermograms of KDML 105 milled rice preheated at 60 ˚C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min during storage under (a) Ambient temperature (28-32 ˚C) + nylon bag, (b) Ambient temperature (28-32 ˚C) + nylon bag + vacuum, (c) 20 ˚C + nylon bag and (d) 20 ˚C + nylon bag + vacuum


(b)
0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
ΔH = 2.51 J/g
12 months
ΔH = 2.47 J/g
9 months
ΔH = 2.63 J/g
6 months
ΔH = 1.86 J/g
3 months
ΔH = 1.12 J/g
0 month
Endothermic heat flow
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
95 105 115 125 135
Temperature (°C)
125 135 145 155 165 175
Temperature (°C)
50 55 60 65 70 75 80 85 90
Temperature (°C)


(c)
0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
ΔH = 2.42 J/g
12 months
ΔH = 2.82 J/g
9 months
ΔH = 2.26 J/g
6 months
ΔH = 1.50 J/g
3 months
ΔH = 1.12 J/g
0 month
Endothermic heat flow
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
95 105 115 125 135
Temperature (°C)
125 135 145 155 165 175
Temperature (°C)
50 55 60 65 70 75 80 85 90
Temperature (°C)

ภาพที่ 20 (ต่อ)

(d)


0.1 mW
ΔH = 11.01 J/g
raw rice
ΔH = 1.10 J/g
12 months
ΔH = 1.16 J/g
9 months
ΔH = 1.48 J/g
6 months
ΔH = 1.04 J/g
3 months
ΔH = 1.12 J/g
0 month
Endothermic heat flow
50 55 60 65 70 75 80 85 90
Temperature (°C)
raw rice
12 months
9 months
6 months
3 months
0 month
95 105 115 125 135
125 135 145 155 165 175

ภาพที่ 20 (ต่อ)

ตารางที่ 19 ช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระหว่างการเก็บรักษา โดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100° ซ นาน 30 นาที

Gelatinization temperature range and enthalpy of KDML 105 milled rice during storage steamed at 100°C for 30 min

Storage condition	Storage (months)	Gelatinization temperature (°C)			Enthalpy (ΔH)(J/g)	Enthalpy (ΔH)(J/g) (Melting temperature (T_o-T_c) (°C))	
		T_o	T_p	T_c		complex I[a]	complex II[b]
Fresh rice	0	63.09	69.50	77.54	11.01	1.38 (107.33-117.83)	4980.02 (150.67-176.33)
Ambient temperature	3	ND	ND	ND	ND	2.17 (102.00-116.50)	7159.78 (150.33-178.67)
(28-32°C) + nylon bag	6	ND	ND	ND	ND	2.79 (105.50-119.17)	6884.17 (148.67-179.17)
	9	ND	ND	ND	ND	1.43 (106.50-112.67)	7593.15 (134.33-168.00)
	12	ND	ND	ND	ND	5.20 (110.17-121.17)	7956.53 (140.50-174.50)
Ambient temperature	3	ND	ND	ND	ND	2.04 (108.50-118.17)	6303.82 (144.33-180.00)
(28-32°C) + nylon bag	6	ND	ND	ND	ND	3.03 (111.17-118.33)	7160.37 (150.33-179.17)
+ vacuum	9	ND	ND	ND	ND	2.24 (103.67-116.33)	7794.31 (149.00-180.00)
	12	ND	ND	ND	ND	1.40 (108.00-116.50)	7140.55 (151.17-180.00)
20°C + nylon bag	3	ND	ND	ND	ND	3.43 (113.17-125.00)	6103.70 (142.33-173.50)
	6	ND	ND	ND	ND	1.18 (104.00-119.83)	5620.63 (144.50-171.83)
	9	ND	ND	ND	ND	1.43 (103.17-117.33)	7206.01 (149.33-178.00)
	12	ND	ND	ND	ND	1.37 (106.83-117.83)	6978.25 (148.67-177.83)

Note: T_o : onset temperature; T_p : peak gelatinization temperature; T_c : conclusion temperature; ND : not detected

[a]Amylose-lipid complex type I

[b]Amylose-lipid complex type II

ตารางที่ 19 (ต่อ)

Storage condition	Storage (months)	Gelatinization temperature (°C)			Enthalpy (ΔH)(J/g)	Enthalpy (ΔH)(J/g) (Melting temperature (T_o-T_c) (°C))	
		T_o	T_p	T_c		complex I[a]	complex II[b]
20°C + nylon bag +	3	ND	ND	ND	ND	1.31 (112.17-117.00)	6417.87 (147.33-177.17)
vacuum	6	ND	ND	ND	ND	2.29 (106.00-117.00)	6116.29 (149.50-179.50)
	9	ND	ND	ND	ND	2.42 (103.67-116.83)	7586.51 (149.00-180.00)
	12	ND	ND	ND	ND	2.34 (102.67-114.00)	6037.92 (138.00-178.17)

Note: T_o : onset temperature; T_p : peak gelatinization temperature; T_c : conclusion temperature; ND : not detected

[a]Amylose-lipid complex type I

[b]Amylose-lipid complex type II

ตารางที่ 20 ช่วงอุณหภูมิและค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนซ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระหว่างการเก็บรักษา โดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที

Gelatinization temperature range and enthalpy of KDML 105 milled rice during storage preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min

Storage condition	Storage (months)	Gelatinization temperature (°C)			Enthalpy (ΔH)(J/g)	Enthalpy (ΔH)(J/g) (Melting temperature (T_o-T_c) (°C))	
		T_o	T_p	T_c		complex I[a]	complex II[b]
Fresh rice	0	63.09	69.50	77.54	11.01	1.38 (107.33-117.83)	4980.02 (150.67-176.33)
Ambient temperature	3	58.39	65.33	72.32	1.69	1.80 (105.00-119.83)	6577.11 (147.73-171.67)
(28-32°C) + nylon bag	6	61.92	67.17	73.82	2.88	1.19 (110.17-123.67)	6949.68 (149.00-176.00)
	9	63.26	67.00	72.28	2.15	2.54 (104.00-115.50)	7560.17 (146.88-173.83)
	12	59.79	65.83	71.56	2.69	5.72 (112.00-128.17)	7928.69 (143.83-175.50)
Ambient temperature	3	59.50	65.67	71.42	1.86	2.36 (111.00-120.50)	7377.26 (148.67-177.67)
(28-32°C) + nylon bag	6	63.52	67.67	73.81	2.63	0.82 (104.00-117.53)	7042.72 (148.67-175.50)
+ vacuum	9	60.02	66.83	72.07	2.47	1.22 (104.33-113.33)	6908.87 (150.83-180.00)
	12	60.73	66.83	72.19	2.51	1.36 (107.17-116.33)	6677.31 (148.67-173.67)
20°C + nylon bag	3	59.17	65.17	73.14	1.50	1.06 (106.83-118.33)	7394.67 (148.67-175.67)
	6	63.39	67.67	72.42	2.26	0.51 (109.50-116.17)	6671.95 (148.17-175.67)
	9	62.78	67.17	74.32	2.82	1.60 (105.83-117.33)	6230.44 (150.67-175.17)
	12	62.63	68.00	72.93	2.42	1.77 (103.00-115.50)	6363.23 (144.17-172.67)

Note: T_o : onset temperature; T_p : peak gelatinization temperature; T_c : conclusion temperature; ND : not detected

[a]Amylose-lipid complex type I; [b]Amylose-lipid complex type II

ตารางที่ 20 (ต่อ)

Storage condition	Storage (months)	Gelatinization temperature (°C)			Enthalpy (ΔH)(J/g)	Enthalpy (ΔH)(J/g) (Melting temperature (T_o-T_c) (°C))	
		T_o	T_p	T_c		complex I[a]	complex II[b]
20°C + nylon bag +	3	58.79	66.83	73.01	1.04	1.05 (107.33-127.00)	7566.94 (150.17-178.50)
vacuum	6	60.74	67.00	72.42	1.48	1.79 (104.50-118.50)	6457.39 (147.50-172.17)
	9	63.72	68.00	73.98	1.16	1.93 (106.17-125.67)	6457.04 (148.67-180.00)
	12	60.49	66.83	73.07	1.10	6.39 (103.83-120.83)	6170.35 (150.00-177.83)

Note: T_o : onset temperature; T_p : peak gelatinization temperature; T_c : conclusion temperature; ND : not detected

[a]Amylose-lipid complex type I

[b]Amylose-lipid complex type II

ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งจะเป็นดัชนีที่ใช้บ่งถึงสมบัติทางกายภาพของเนื้อเมล็ด รวมทั้งความสามารถในการดูดซับน้ำ โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของผลึกที่แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวและเสียรูปร่างเดิมไป หรือโครงสร้างในส่วนของผลึกถูกทำลาย (Juliano, 1985) พิจารณาจากการทดลองของ Chung และคณะ (2004) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกและอุณหภูมิเจลาติไนซ์ของสตาร์ชข้าวเจ้าและข้าวเหนียวภายหลังการบ่มที่อุณหภูมิ 50°ซ ในช่วงระยะเวลา 0-240 ชั่วโมง พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนเฟสจากแบบกึ่งผลึกเป็นอสัณฐานโดยอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนซ์สูงสุด (T_p) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อบ่มสตาร์ชเป็นเวลานานขึ้น และช่วงระยะเวลาในการเกิดเจลาติไนซ์แปรผันโดยตรงกับปริมาณผลึกที่คงอยู่ภายหลังการบ่มที่สภาวะดังกล่าว จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน 4 สภาวะ ได้แก่ การบรรจุในถุงไนลอนในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 20°ซ และอุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) เป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12 เดือน เมื่อนำมาทำให้สุกด้วยความร้อนแล้ววิเคราะห์ชนิดโครงสร้างของผลึกโดยใช้ XRD พบว่าข้าวสุกจากข้าวสารที่เก็บรักษาตามสภาวะข้างต้นทั้ง 4 สภาวะ ในแต่ละช่วงเวลาการเก็บนาน 12 เดือนนั้น มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบผลึกไม่แตกต่างจากข้าวสุกด้วยความร้อนในเดือนที่ 0 (ภาพที่ 21) โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึกจากลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในข้าวดิบ ซึ่งให้พีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ เปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบอสัณฐานร่วมกับโครงสร้างผลึกแบบ V ซึ่งพบพีคเล็กที่ประมาณ 20°2θ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (Biliaderis *et al*., 1986b; Biliaderis and Galloway, 1989; Biliaderis and Seneviratne, 1990; Donovan *et al*., 1983;

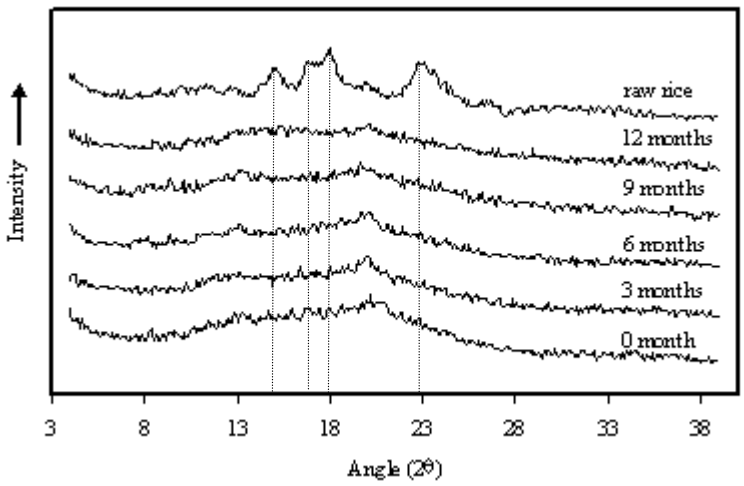
Galloway *et al*., 1989; Hibi *et al*., 1990; Kugimiya *et al*., 1980; Sandeep *et al*., 1994) และรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบ V จะปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 21 และมีเฉพาะข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) นาน 9 เดือน เท่านั้นที่ภายหลังการทำให้สุกด้วยความร้อนมีพีคเล็กปรากฏเพิ่มที่ประมาณ 10°2θ (ภาพที่ 21b) ซึ่งอาจเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (Katapo *et al*., 2002) แตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างผลึกใน parboiled rice ที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกจากแบบ V ซึ่งเกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันเปลี่ยนเป็นแบบ B เนื่องจากการเกิดรีโทรกราเดชันภายหลังการเก็บรักษา แต่จะกลับมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ V อีกครั้งเมื่อนำข้าวดังกล่าวมาให้ความร้อนซ้ำอีกครั้ง (Charbonniere, 1975 อ้างโดย Juliano,

1985) การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในการทดลองสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเกิดเจลาติไนซ์ด้วย DSC ซึ่งพบว่าข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศ
ที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) และ 20°ซ หลังจากนำมาทำให้สุกด้วยความร้อนแล้วไม่ปรากฏค่าพลังงานที่ต้องการในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง และค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันทั้ง 2 ชนิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 110°ซ และ 160°ซ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ของการเจลาติไนซ์และรูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวสุกด้วยวิธีใช้ความร้อน แม้ว่าปริมาณขององค์ประกอบหลักเกือบทั้งหมดของเมล็ดข้าวจะไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะปริมาณอะมิโลสและปริมาณโปรตีน (Barber, 1972; Villareal *et al*., 1976; Indudhara Swamy *et al*., 1978) แต่ในขณะเก็บรักษาอาจเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือการแตกตัวของสารบางชนิดในองค์ประกอบเกิดขึ้น ซึ่งมีผลสำคัญต่อคุณภาพข้าวกล้องและข้าวสารในการหุงต้มและการบริโภคโดยมีผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวสุก สอดคล้องกับรายงานของ Moritaka และ Yasumatsu (1972) ที่อธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันและโปรตีนที่เกิดขึ้นระหว่างการเก็บรักษาข้าวดิบโดยกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลส ส่วนสารไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันแล้วสลายตัวต่อไปได้เป็นสารคาร์บอนิลที่สามารถเร่งการเกิดออกซิเดชันของโปรตีน (เกิดพันธะไดซัลไฟด์จากหมู่ซัลไฮดริล) อีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ ferulate esters ในส่วนของเฮมิเซลลูโลสก่อให้เกิด cross-linking แก่ผนังเซลล์ของเมล็ดข้าวในระหว่างการเก็บรักษาซึ่งส่งผลเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเมล็ดและยับยั้งการพองตัวของแป้งสตาร์ชให้เนื้อสัมผัสของข้าวสุกที่แข็งขึ้น (Mod *et al*., 1983)

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่นำมาให้สุกด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที ภายหลังการเก็บรักษาข้าวสารในสภาวะที่แตกต่างกันทั้ง 4 สภาวะ เมื่อตรวจสอบชนิดโครงสร้างของผลึกโดยใช้ XRD พบว่าข้าวสุกที่ได้จากการเก็บรักษาข้าวสารในทุกสภาวะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกไม่แตกต่างจากข้าวสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับความดันในเดือนที่ 0 โดยยังมีพีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ ที่แสดงรูปแบบของโครงสร้างผลึกแบบ A ปรากฏอยู่ ดังภาพที่ 22 และจากการคำนวณปริมาณผลึกโดยใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่พีคที่ 15.2, 17.0, 17.9 และ 22.9°2θ ต่อพื้นที่ทั้งหมด เริ่มจากพีคที่ 15.2 ถึง 22.9°2θ พบว่าปริมาณผลึกของข้าวสารภายหลังเก็บรักษาในแต่ละสภาวะ แล้วนำมาทำให้สุกด้วยการให้ความ

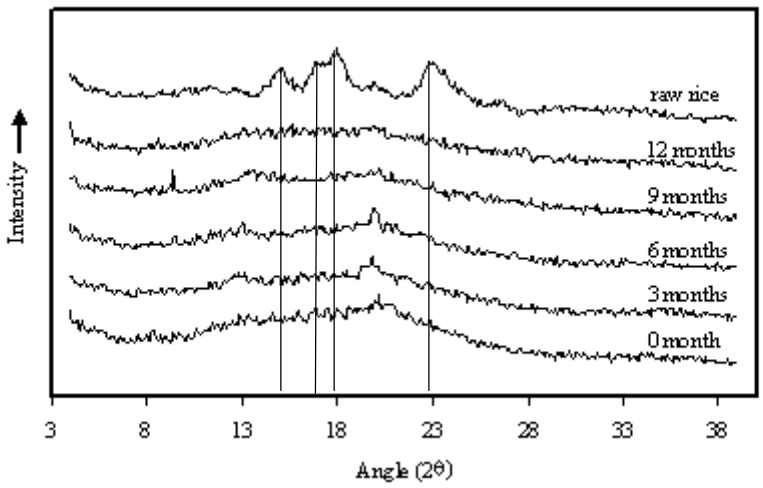
ร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตลอดระยะเวลา 0-12 เดือน โดยข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20 ˚ซ เป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12 เดือน ภายหลังการทำให้

(a)

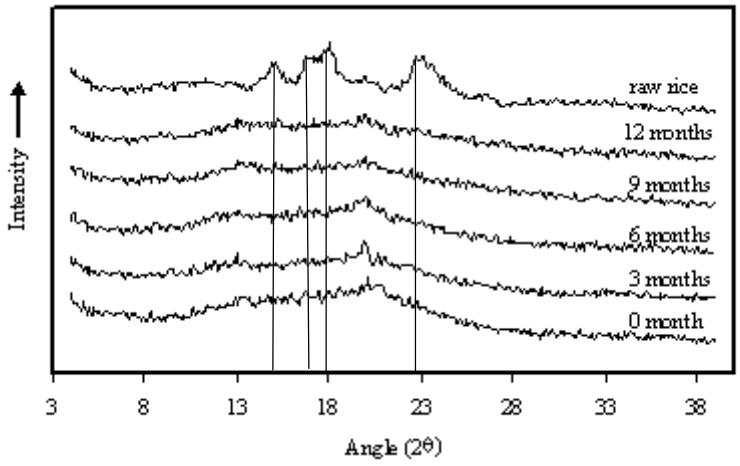


ภาพที่ 21 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 ˚ซ นาน 30 นาที ในระหว่างเก็บรักษาภายใต้สภาวะ (a) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32˚ซ), (b) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (28-32˚ซ), (c) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 20˚ซ และ (d) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20˚ซ
X-ray diffractograms of KDML 105 milled rice steamed at 100 ˚C for 30 min during storage under (a) Ambient temperature (28-32 ˚C) + nylon bag, (b) Ambient temperature (28-32 ˚C) + nylon bag + vacuum, (c) 20 ˚C + nylon bag and (d) 20 ˚C + nylon bag + vacuum

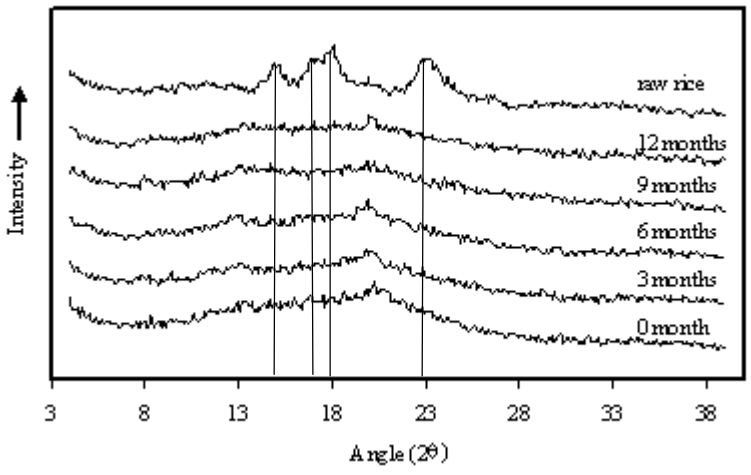
(b)



(c)



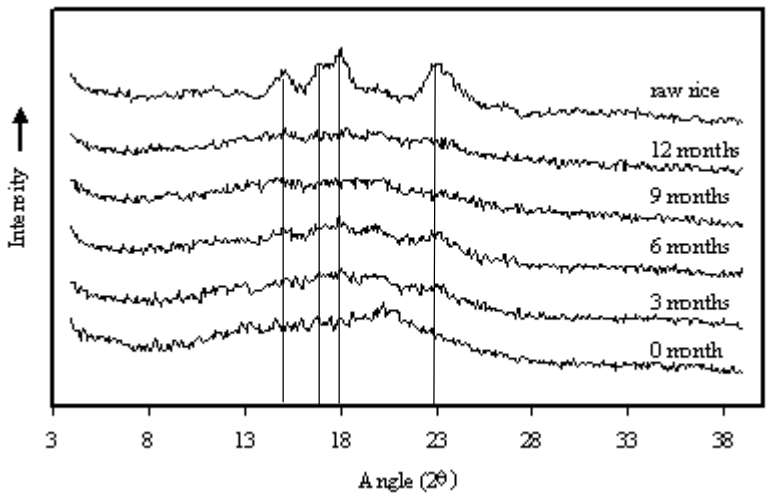
(d)



ภาพที่ 21 (ต่อ)

สุกด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลึกน้อยที่สุดเมื่อเก็บรักษานานขึ้น (ภาพที่ 22d) โดยมีค่าปริมาณผลึกเท่ากับร้อยละ 8.58, 8.35, 7.63, 7.95 และ 9.01 ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการตรวจสอบความสมบูรณ์ของการเจลาติไนซ์ด้วย DSC ซึ่งข้าวสารที่เก็บรักษาในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20°ซ ภายหลังการทำให้สุกด้วยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันมีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา (1.04-1.48 จูลต่อกรัม) ในช่วงการเก็บรักษานาน 12 เดือน

(a)

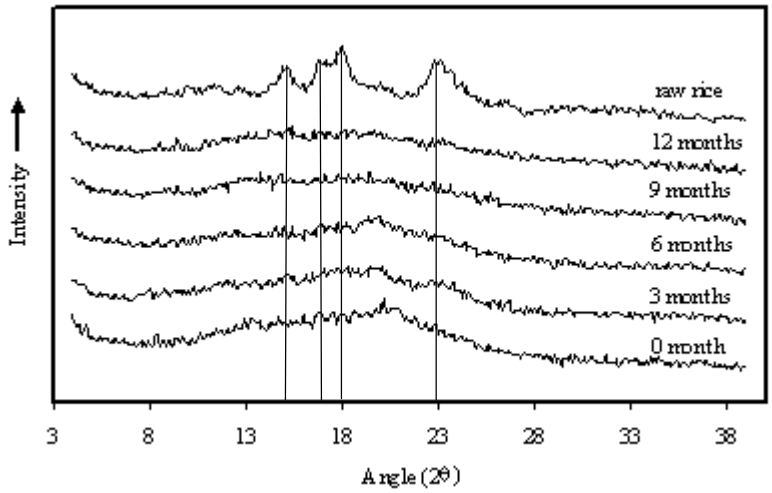


ภาพที่ 22 รูปแบบโครงสร้างผลึกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่

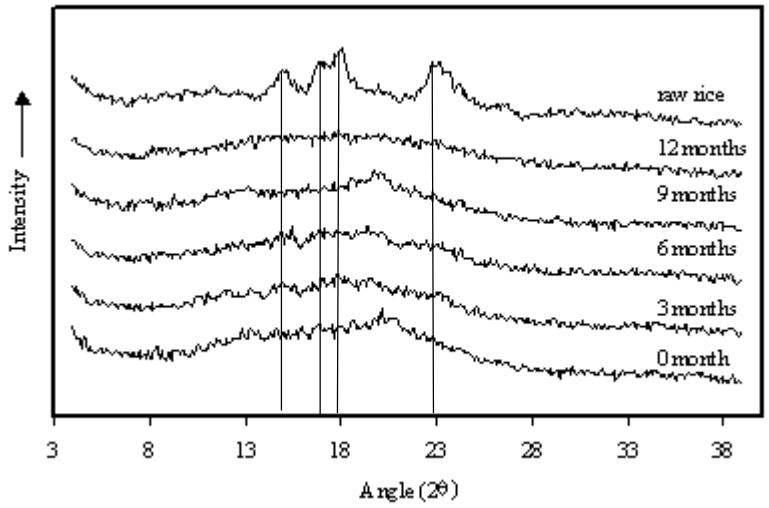
อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างเก็บรักษาภายใต้สภาวะ (a) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ), (b) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ), (c) ในสภาพบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 20°ซ และ (d) ในสภาพสุญญากาศที่อุณหภูมิ 20°ซ

X-ray diffractograms of KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min during storage under (a) Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag, (b) Ambient temperature (28-32°C) + nylon bag + vacuum, (c) 20°C + nylon bag and (d) 20°C + nylon bag + vacuum

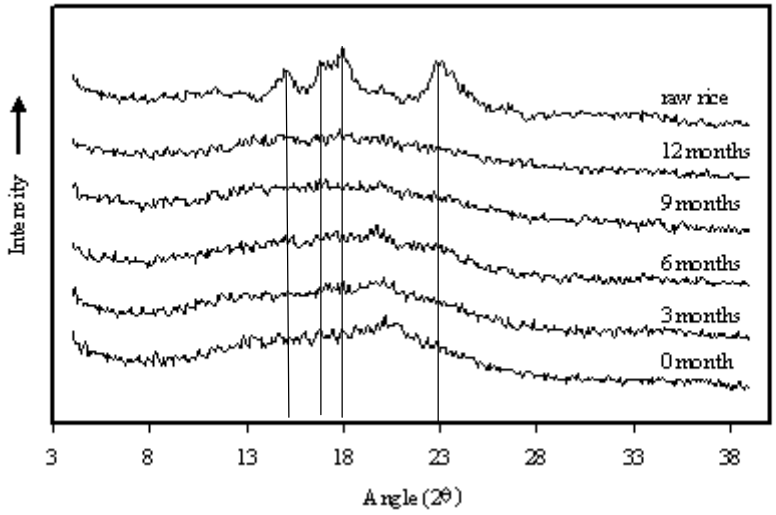
(b)



(c)



(d)



ภาพที่ 22 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ชนิดสารที่ระเหยได้ในข้าวสุกใหม่พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากการทดลองในตอนที่ 2 เรื่องผลของการใช้ความร้อนและการใช้ความดันสูงต่อการสุกของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าสารที่ทำหน้าที่ให้กลิ่นหลักในข้าวสุก คือ 2AP และสารที่ให้กลิ่นไม่พึงประสงค์ คือ สารคาร์บอนิล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง n-hexanal และ n-nonanal ดังนั้นจึงเลือกติดตามการเปลี่ยนแปลงเฉพาะสารที่สำคัญ 3 ชนิดนี้ ได้แก่ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ของข้าวสุกภายหลังการเก็บรักษาข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในสภาวะที่แตกต่างกัน 4 สภาวะ ได้แก่ การบรรจุในถุงไนลอนในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 20°ซ และอุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 เดือน ตามลำดับ แล้วจึงนำมาทำให้สุกด้วย 2 วิธี คือ (1) การใช้ความร้อนโดยวิธีการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1.5 : 1 และ (2) การให้ความร้อนร่วมกับความดัน โดยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 2 โดยใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายแล้ววิเคราะห์ส่วนที่สกัดได้ด้วย GC-MS (ตารางภาคผนวกที่ 1) ได้ผลดังนี้

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของสารที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวสุกด้วยวิธีที่ (1) คือ การใช้ความร้อนในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการเก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิ สภาพการบรรจุ และระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่สำคัญทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 21 พบว่าภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 20°ซ ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศมีปริมาณของ 2AP คงเหลือมากกว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) โดยมีค่า Relative peak area (%) เท่ากับร้อยละ 22.00 และ 22.68 ตามลำดับ และมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.81 และ 13.44 ภายหลังการเก็บนาน 9 เดือน ซึ่งปริมาณ 2AP ลดลงน้อยกว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศ ซึ่งมีค่า Relative peak area (%) เท่ากับร้อยละ 17.14 และ 18.26 ตามลำดับ เมื่อเก็บเป็นระยะเวลา 3 เดือน และมีค่าคงเหลือเท่ากับร้อยละ 6.59 และ 8.93 ตามลำดับ ภายหลังการเก็บรักษานาน 9 เดือน อย่างไรก็ตามพบว่าการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ส่งผลให้ปริมาณ n-hexanal และ n-nonanal เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น โดยเฉพาะการเพิ่มของ n-hexanal ซึ่งภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศ มีค่า Relative peak area (%) ของ n-hexanal เพิ่มขึ้น มี

ค่าเท่ากับร้อยละ 12.17 และ 11.17 และมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 57.35 และ 51.71 ตามลำดับ ภายหลังการเก็บนาน 12 เดือน (ตารางที่ 21)

ตารางที่ 21 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที ในระหว่างเก็บรักษา

Changes in relative amounts of 2AP, n-hexanal and n-nonanal in KDML 105 milled rice steamed at 100°C for 30 min during storage

Storage condition	Storage (months)	Relative peak area (%)*		
		n-hexanal	2AP	n-nonanal
freshly harvested raw rice	0	10.01	47.60	2.17
freshly harvested cooked rice	0	6.99	28.00	5.96
ambient temperature (28-32°C) + nylon bag	3	12.17	17.14	7.83
	6	22.04	13.89	11.17
	9	57.28	6.59	19.09
	12	57.35	5.08	28.02
20°C + nylon bag	3	8.84	22.00	6.24
	6	16.90	19.93	11.79
	9	34.41	14.81	16.90
	12	38.88	8.54	23.08
ambient temperature (28-32°C) + nylon bag + vacuum	3	11.17	18.26	8.12
	6	27.13	13.93	10.86
	9	53.64	8.93	29.24
	12	51.71	8.76	30.03
20°C + nylon bag + vacuum	3	8.43	22.68	8.07
	6	15.59	22.11	12.29
	9	29.70	13.44	13.81
	12	33.81	12.83	37.90

Note: *Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

ขณะที่ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 20°ซ ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศมี n-hexanal เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพียงร้อยละ 8.84 และ 8.43 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 38.88 และ 33.81 ตามลำดับ ภายหลังการเก็บนาน 12 เดือน สอดคล้องกับการทดลองของ Tsugita และคณะ (1980) ซึ่งพบว่าข้าวกล้องที่เก็บที่อุณหภูมิ 40°ซ เป็นเวลา 60 วัน มีลักษณะของข้าวเก่าเกิดขึ้นโดยพบสารที่ให้กลิ่นไม่พึงประสงค์ ได้แก่ acetone, pentanal, hexanal, pentanol และ hexanol ในปริมาณสูงกว่าข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°ซ โดย hexanal มีปริมาณสูงสุด เช่นเดียวกันกับการทดลองของ Villareal และคณะ (1976) ที่พบการเพิ่มของสารคาร์บอนิลอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 2-4 สัปดาห์ในข้าวสารที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29°ซ โดยเฉพาะการเพิ่มของ hexanal ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่มีอยู่ในองค์ประกอบตามธรรมชาติ คือ ไกลโคลิพิด ฟอสโฟลิพิดและนิวทรัลลิพิดในข้าวที่ถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ไลเพสและไฮโดรเลสได้เป็นกรดไขมันอิสระ เช่น กรดลิโนเลอิก และกรดลิโนเลนิก ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้จะถูกออกซิไดซ์ต่อโดยเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสได้เป็นสารเพอร์ออกไซด์แล้วเกิดสลายตัวต่อไปได้เป็นสารคาร์บอนิล (Endo *et al*., 1977; Gardner, 1988; Shin *et al*., 1986) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสภาพการบรรจุ พบว่าทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal จากตารางที่ 21 พบว่าการเก็บรักษาข้าวสารในสภาพสุญญากาศสามารถช่วยชะลอการเพิ่มของ n-hexanal อีกทั้งมีปริมาณของ 2AP คงเหลือมากกว่าการเก็บรักษาข้าวสารในสภาพบรรยากาศปกติ โดยภายหลังการเก็บรักษานาน 12 เดือน ที่อุณหภูมิ 20°ซ ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศมีค่า Relative peak area (%) ของ n-hexanal ที่พบในข้าวสุกมีค่าเท่ากับร้อยละ 33.81 ซึ่งเพิ่มขึ้นน้อยกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 38.88 สอดคล้องกับการทดลองของ Widjaja และคณะ (1996) ซึ่งศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวหอมพันธุ์ Australian YRF9 ในรูปของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารที่อุณหภูมิ 30°ซ ในสภาพบรรยากาศปกติ และภายใต้สภาวะการบรรจุแบบสุญญากาศ โดยพบว่าภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือน ข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติมีปริมาณ n-hexanal เพิ่มขึ้นเท่ากับ 5,066 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ข้าวสารที่เก็บในสภาวะสุญญากาศกลับมีปริมาณ n-hexanal ลดลงเหลือ 1,047 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม เปรียบเทียบกับปริมาณ n-hexanal ในข้าวสารใหม่ ที่มีค่าเท่ากับ 1,396 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม และที่สภาวะการเก็บเดียวกันนี้ คือ ระยะเวลาในการเก็บนาน 12 เดือน ที่อุณหภูมิ 20°ซ ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศมีค่า Relative peak area (%) ของ 2AP ในข้าวสุก มีค่าเท่ากับร้อยละ 12.83 ซึ่งคงเหลือมากกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติที่มีค่าเพียงร้อยละ 8.54 ผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับการทดลองของ Widjaja และคณะ (1996) ที่รายงานว่าภายหลังการเก็บรักษานาน 3 เดือนที่

อุณหภูมิ 30°ซ ข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติมีปริมาณ 2AP ลดลงเหลือ 326 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งคงเหลือมากกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาวะสุญญากาศที่มีค่าเท่ากับ 241 เปรียบเทียบกับปริมาณ 2AP ในข้าวสารใหม่ (670 ไมโครกรัมต่อกิโลกรัม) มีค่าลดลงเหลือร้อยละ 40-50 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมในระหว่างเก็บรักษาที่ต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณของ 2AP ลดลงอย่างรวดเร็วเปรียบเทียบกับการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ (Sharp *et al*., 1986; Yoshihashi *et al*., 2005) ดังนั้นการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิ 30°ซ ย่อมมีผลให้ 2AP ลดลงในปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเก็บข้าวสารที่อุณหภูมิ 20°ซ ประกอบกับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แตกต่างกัน โดยในการทดลองของ Widjaja และคณะ (1996) เลือกใช้ถุงโพลิเอทธิลีนซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซน้อยกว่าถุงไนลอน จึงทำให้ 2AP อิสระที่สามารถระเหยได้ง่ายแพร่ออกสู่ภายนอกในปริมาณเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของสารที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวสุกด้วยวิธีที่ (2) คือ การให้ความร้อนร่วมกับความดันในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการเก็บรักษาในสภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าอุณหภูมิ สภาพการบรรจุ และระยะเวลาการเก็บรักษาที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารที่สำคัญทั้ง 3 ชนิด เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 22 พบว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 20°ซ ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศในช่วง 3 เดือนแรกมีปริมาณของ 2AP คงเหลือมากกว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) โดยมีค่า Relative peak area (%) เท่ากับร้อยละ 20.48 และ 23.67 และเท่ากับร้อยละ 17.74 และ 15.37 ในเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษา ขณะที่ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ในสภาพบรรยากาศปกติและสภาพสุญญากาศเป็นระยะเวลานาน 3 เดือนมีค่า Relative peak area (%) ของ 2AP เท่ากับร้อยละ 13.77 และ 11.74 และในเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษามีค่าลดลงเหลือเพียงร้อยละ 7.24 และ 9.36 ตามลำดับ สอดคล้องกับการทดลองของ Yoshihashi และคณะ (2005) ซึ่งศึกษาการเก็บรักษาข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 5°ซ, 20°ซ, 25°ซ และ 30°ซ บรรจุในถุงโพลิเอทธิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และถุงไนลอนภายใต้สภาพบรรยากาศปกติ พบว่าการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิต่ำ (5°ซ) มีปริมาณของ 2AP คงเหลืออยู่มากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (25°ซ และ 30°ซ) ซึ่งมีผลให้ปริมาณของ 2AP ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงการเก็บรักษา 7 สัปดาห์แรก เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ คือ LDPE ไม่สามารถป้องกันการแพร่ออกของ 2AP อิสระที่สามารถระเหยได้ง่าย โดยภายหลังการสกัดด้วยตัวทำละลายจะพบ 2AP ส่วนที่รวมตัวอยู่กับสตาร์ชและโปรตีนในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ทั้งยังมีรายงานการทดลองของ Siebenmorgen (1998) ซึ่งแสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นของข้าวกล้อง

ญี่ปุ่นพันธุ์ Sasamishiki ภายหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (2-33°ซ) เปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 2-15°ซ นาน 12 เดือน โดยระบุว่าข้าวกล้องที่เก็บที่อุณหภูมิ 2-15°ซ มีระดับคะแนนกลิ่นหอมไม่เปลี่ยนแปลงจากเริ่มต้น

ตารางที่ 22 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่

ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที ในระหว่างเก็บรักษา

Changes in relative amounts of 2AP, n-hexanal and n-nonanal in KDML 105 milled rice preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min during storage

Storage condition	Storage (months)	Relative peak area (%)*		
		n-hexanal	2AP	n-nonanal
freshly harvested raw rice	0	10.01	47.60	2.17
freshly harvested cooked rice	0	8.32	29.77	7.10
ambient temperature (28-32°C) + nylon bag	3	12.59	13.77	11.38
	6	26.60	7.24	18.08
	9	28.21	11.18	6.22
	12	44.10	9.86	25.35
20°C + nylon bag	3	4.81	20.48	5.81
	6	18.93	17.74	15.55
	9	43.89	11.53	19.54
	12	52.84	7.41	11.55
ambient temperature (28-32°C) + nylon bag + vacuum	3	10.65	11.74	9.71
	6	16.66	9.36	14.06
	9	31.74	10.97	13.09
	12	35.61	6.63	15.62
20°C + nylon bag + vacuum	3	6.43	23.67	7.98
	6	13.32	15.37	12.05

	9	21.73	11.49	9.20
	12	21.76	9.11	15.01

Note: *Relative peak area (%) is calculated based on specific peak area of each volatile compound in a sample.

อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาข้าวสารที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ส่งผลให้ปริมาณ n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวสุกด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยภายหลังการเก็บนาน 3 เดือน ข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (28-32°ซ) ในสภาพบรรยากาศปกติและสุญญากาศมีค่า Relative peak area (%) ของ n-hexanal และ n-nonanal เพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวสารที่เก็บที่อุณหภูมิ 20°ซ มีค่าเท่ากับร้อยละ 12.59, 10.65 และ 11.38, 9.71 และเท่ากับร้อยละ 4.81, 6.43 และ 5.81, 7.98 ตามลำดับ โดยเฉพาะการเพิ่มของ hexanal ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันที่มีอยู่ในองค์ประกอบของข้าวและถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ไลเพสและไฮโดรเลสได้เป็นกรดไขมันอิสระ เช่น กรดลิโนเลอิก และ กรดลิโนเลนิก กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้จะถูกออกซิไดซ์ต่อโดยเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสได้เป็นสารเพอร์ออกไซด์แล้วเกิดสลายตัวต่อไปได้เป็นสารคาร์บอนิล (Endo *et al*., 1977; Gardner, 1988; Shin *et al*., 1986) และจากการทดลองของ Sharp และ Timme (1986) ที่พบว่าการเก็บข้าวกล้องที่อุณหภูมิ 3°ซ เป็นระยะเวลานาน 9 เดือน สามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้การทดสอบทางประสาทสัมผัสระบุว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (3°ซ) ช่วยคงกลิ่นหอมและลดการเกิดกลิ่นสาบเก่าในข้าวสุกได้ดีกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง (22°ซ และ 38°ซ) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสภาพการบรรจุ พบว่าทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal จากตารางที่ 22 พบว่าการเก็บรักษาข้าวสารในสภาพสุญญากาศสามารถช่วยชะลอการเพิ่มของ n-hexanal อีกทั้งมีปริมาณของ 2AP คงเหลือมากกว่าการเก็บรักษาข้าวสารในสภาพบรรยากาศปกติ โดยภายหลังการเก็บรักษานาน 12 เดือน ที่อุณหภูมิ 20°ซ ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศมีค่า Relative peak area (%) ของ n-hexanal ที่พบในข้าวสุกเท่ากับร้อยละ 21.76 ซึ่งเพิ่มขึ้นน้อยกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 52.84 และที่สภาวะการเก็บเดียวกันนี้ ข้าวสารที่เก็บในสภาพสุญญากาศมีค่า Relative peak area (%) ของ 2AP ในข้าวสุกเท่ากับร้อยละ 9.11 ซึ่งคงเหลืออยู่มากกว่าข้าวสารที่เก็บในสภาพบรรยากาศปกติที่มีค่าเพียงร้อยละ 7.41

4. ศึกษาผลของการแปรรูปต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ระเหยได้ในข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการศึกษาปริมาณของสารที่ระเหยได้ที่มีความสำคัญต่อกลิ่นรส ได้แก่ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกัน จำนวน 3 แหล่ง คือ จังหวัดสุรินทร์ จังหวัดขอนแก่น และจังหวัดอำนาจเจริญ และปริมาณของสารที่ระเหยได้ดังกล่าวในข้าวสุกจากแต่ละแหล่ง ทำให้สุกด้วย 2 วิธี คือ (1) การใช้ความร้อนโดยวิธีการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1.5 : 1 และ (2) การให้ความร้อนร่วมกับความดัน โดยวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็นเวลา 30 นาที กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อข้าวเท่ากับ 1 : 2 นำมาวิเคราะห์ปริมาณสารที่ระเหยได้ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายและใช้ 2,4,6-trimethylpyridine (TMP) เป็น internal standard ซึ่งพิจารณาจากสมบัติของ TMP ได้แก่ สภาพความเป็นกรดด่าง การละลายน้ำและความสามารถในการระเหยที่ใกล้เคียงกับ 2AP โดย internal standard ที่ใช้ต้องมีความคงตัวมี retention time ใกล้เคียงกับสารที่ระเหยได้ที่สนใจและเป็นสารที่มีจำหน่ายในทางการค้า (Buttery *et al*., 1986) แล้ววิเคราะห์ส่วนที่สกัดได้ด้วย GC-MS (ตารางภาคผนวกที่ 1) และคำนวณหาความเข้มข้นของสารที่ระเหยได้ โดยการหา relative recovery factor (RRF) ของสารที่ระเหยได้แต่ละชนิด แล้วคำนวณความเข้มข้นของสารที่ระเหยได้แต่ละชนิดดังสมการที่แสดงในภาคผนวก ข, ข้อ 2 เรื่องการวิเคราะห์ปริมาณสารที่ระเหยได้ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากการหาความเข้มข้นของสารที่ระเหยได้ที่สำคัญในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุก พบว่าปริมาณของ 2AP ในข้าวสารและข้าวสุกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแหล่งปลูกต่างกันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากจังหวัดสุรินทร์ ขอนแก่น และอำนาจเจริญมีความเข้มข้นของ 2AP เท่ากับ 0.73, 0.73 และ 0.83 ppb ตามลำดับ ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยวิธีการใช้ความร้อนและวิธีการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันมีความเข้มข้นของ 2AP เท่ากับ 0.38, 0.36, 0.35 และ 0.43, 0.41, 0.40 ppb ตามลำดับ (ตารางที่ 23) จากการศึกษาของ Mahatheeranont และคณะ (2001) โดยวิเคราะห์เชิงปริมาณของ 2AP ในข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย มี TMP เป็น internal standard และใช้ 2AP สังเคราะห์เป็น external standard ในการเขียนกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของ 2AP ที่สกัดได้จากตัวอย่าง จากการทดลองพบว่าข้าวสาร 3 ยี่ห้อมีปริมาณ 2AP แตกต่างกันโดยมีค่าเท่ากับ 0.25, 0.12 และ 0.05 ppm เนื่องมาจากความแตกต่างของอายุการเก็บของข้าวและแหล่งเพาะปลูก (Buttery *et al*., 1983) เมื่อพิจารณาถึงสารคาร์บอนิล ได้แก่ n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากแต่ละแหล่งปลูก พบว่าข้าวสารจากจังหวัดขอนแก่นมีปริมาณของ n-hexanal และ n-nonanal สูงสุดเท่ากับ 1.51 และ 1.67 ppb ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสารจากแหล่งอื่น (ตารางที่ 23) โดย n-hexanal และ n-nonanal เป็นสารที่ให้กลิ่นข้าวเก่า โดยมาจากปฏิกิริยา

ออกซิเดชันของไขมันไม่อิ่มตัว (Endo *et al*., 1977; Buttery *et al*., 1988) เมื่อพิจารณาในตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการใช้ความร้อนและการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดัน พบว่าข้าวสุกโดยการให้ความร้อนเบื้องต้นร่วมกับการใช้ความดันมีความเข้มข้นของ 2AP มากกว่าข้าวสุกโดยการใช้ความร้อน ขณะที่ความเข้มข้นของ n-hexanal และ n-nonanal ซึ่งมีค่ามากกว่าในทุกแหล่งปลูก อย่างไรก็ตามปริมาณของ 2AP ในข้าวสุกทั้ง 2 วิธีมีค่าลดลงมากเปรียบเทียบกับปริมาณ

ตารางที่ 23 ความเข้มข้นของ 2AP, n-hexanal และ n-nonanal ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดิบและสุกโดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°ซ นาน 30 นาที และการให้ความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 15 นาที ร่วมกับการใช้ความดันที่ระดับ 800 เมกกะปาสคาล เป็น

เวลา 30 นาที จากแหล่งปลูกต่างกัน

Changes in relative amounts of 2AP, n-hexanal and n-nonanal in raw and cooked KDML 105 milled rice by steamed at 100°C for 30 min and preheated at 60°C for 15 min co-ordinated with pressured at 800 MPa for 30 min from different sources

Source	Concentration (ppb)[a]		
	n-hexanal	2AP	n-nonanal
Surin province			
raw rice	1.10	0.73	0.48
cooked rice (H)[b]	1.31	0.38	0.98
cooked rice (PH)[c]	1.60	0.43	0.94
Khonkean province			
raw rice	1.51	0.73	1.67
cooked rice (H)	1.69	0.36	0.40
cooked rice (PH)	1.82	0.41	0.82
Aumnadjarean province			
raw rice	0.78	0.83	1.27
cooked rice (H)	1.10	0.35	0.40
cooked rice (PH)	1.99	0.40	0.75

Note: [a] Parts of compound per billion (10^9) parts of sample (wet weight)

[b] Heat treatment

[c] Preheated co-ordinated with high pressure treatment

ของ 2AP ในข้าวสาร แตกต่างจากปริมาณของ n-hexanal ที่มีค่าเพิ่มขึ้นในข้าวสุกจากทั้ง 2 วิธี แต่ n-nonanal มีค่าลดลงจากปริมาณที่พบในข้าวสาร สอดคล้องกับรายงานการทดลองของ Yoshihashi (2002a) ได้วิเคราะห์ในเชิงปริมาณของ 2AP ในข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยวิธี stable isotope dilution method และใช้ 2-acetyl-d_3-1-pyrroline เป็น internal standard โดยหาความเข้มข้นของ 2AP ในสารที่สกัดได้จากตัวอย่างจากกราฟมาตรฐาน พบว่าข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณของ 2AP เท่ากับ 235.1 $\pm$ 24.2 ppb และในข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุกโดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°ซ โดยกำหนดระยะเวลาในการให้ความร้อนเท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 นาที ซึ่งปริมาณของ 2AP มีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น จึงแสดงว่า 2AP ไม่ได้ถูกสร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการทำให้สุกด้วยความร้อน แต่จะถูกสร้างขึ้นในส่วนยอดของลำต้นข้าวระหว่างการเพาะปลูกเท่านั้น โดยในการเติบโตช่วงเมล็ดแก่จะพบ 2AP อิสระภายนอกโครงสร้างแบบกึ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากการสร้าง 2AP จากกรดอะมิโนโพรลีนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นในระยะน้ำนม (10 วันหลังดอกบาน) (Juliano, 1985)