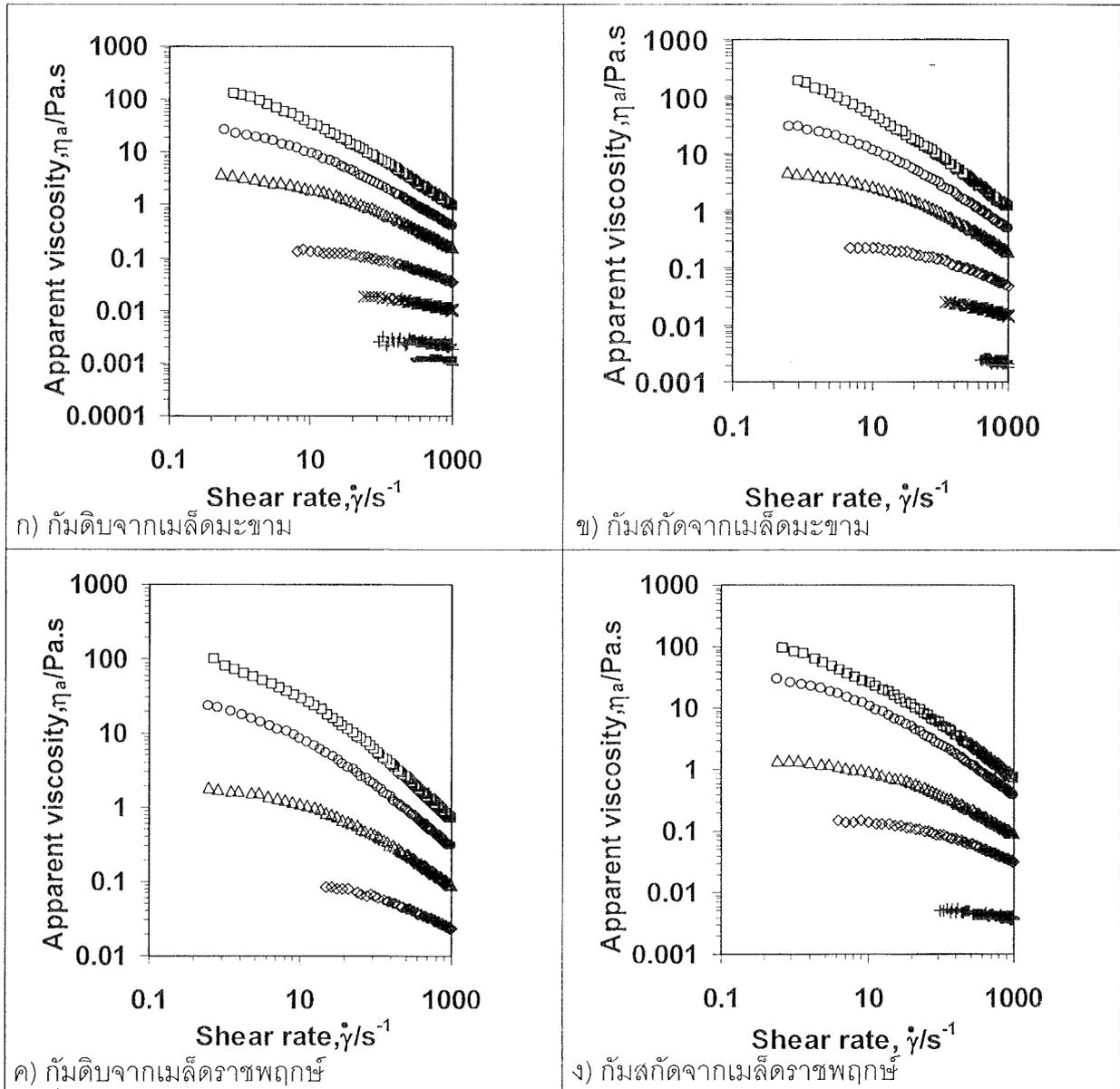


## บทที่ 4 ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

### 4.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายกัมสกัดต่อค่าความหนืดปรากฏ

เตรียมสารละลายกัมดิบและกัมสกัดจากเมล็ดมะขาม และเมล็ดราชพฤกษ์จากขั้นตอนการเตรียมในหัวข้อที่ 3.2 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 – 5.70 จากนั้นทำการทดลองคุณสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Haake Rheometer RS75) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 4.1 พบว่าพฤติกรรมการไหลของสารละลายตัวอย่างแสดงได้สองช่วงพฤติกรรมการไหล กล่าวคือที่ความเข้มข้นสูงๆ (ยกตัวอย่างที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 2.72 สำหรับสารละลายกัมจากเมล็ดมะขาม) เป็นแบบ Shear-thinning กล่าวคือความหนืดปรากฏจะลดลงเมื่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำๆ (ยกตัวอย่างที่ความเข้มข้นน้อยกว่าร้อยละ 0.3 สำหรับสารละลายกัมจากเมล็ดมะขาม) จะแสดงพฤติกรรมการไหลของสารละลายตัวอย่างแบบ Newtonian ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสามารถพบได้ทั่วไปสำหรับสารละลายไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากเมล็ดพืช (Goncalves, Torres, Andrade, Azero, and Lefebvre, 2004; Martin, Freitas, Obayashi, and Sierakowski, 2003; Sittikijyothin, Torres, and Goncalves, 2005)

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกัมตัวอย่างจะทำให้ความหนืดปรากฏของสารละลายตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งความหนืดปรากฏของสารละลายกัมตัวอย่างที่ได้จากเมล็ดราชพฤกษ์จะมีค่ามากกว่าของสารละลายกัมตัวอย่างที่ได้จากเมล็ดมะขามที่ความเข้มข้นเดียวกัน ทั้งนี้สัมพันธ์กับค่ามวลโมเลกุลและค่าความหนืดแบบอินทริกซิกของกัมตัวอย่าง (มวลโมเลกุลเฉลี่ยและความหนืดแบบอินทริกซิกของกัมจากเมล็ดราชพฤกษ์มีค่ามากกว่าของกัมจากเมล็ดมะขาม)



รูปที่ 4.1 Flow Curves ของสารละลายกัมตیبและกัมสกัต์จากเมล็ดมะขามที่ร้อยละความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ก) 0.22 (-), 0.33 (+), 0.67 (x), 1.15 (◇), 2.30 (Δ), 2.75 (O), 5.70 (□); (ข) 0.30 (+), 0.79 (x), 1.31 (◇), 2.72 (Δ), 4.01 (O), 6.82 (□); (ค) 0.60 (◇), 1.10 (Δ), 1.90 (O), 3.40 (□); (ง) 0.22 (+), 0.65 (◇), 1.09 (Δ), 2.17 (O), 3.06 (□)

#### 4.2 ประเมินค่าความหนืดโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์

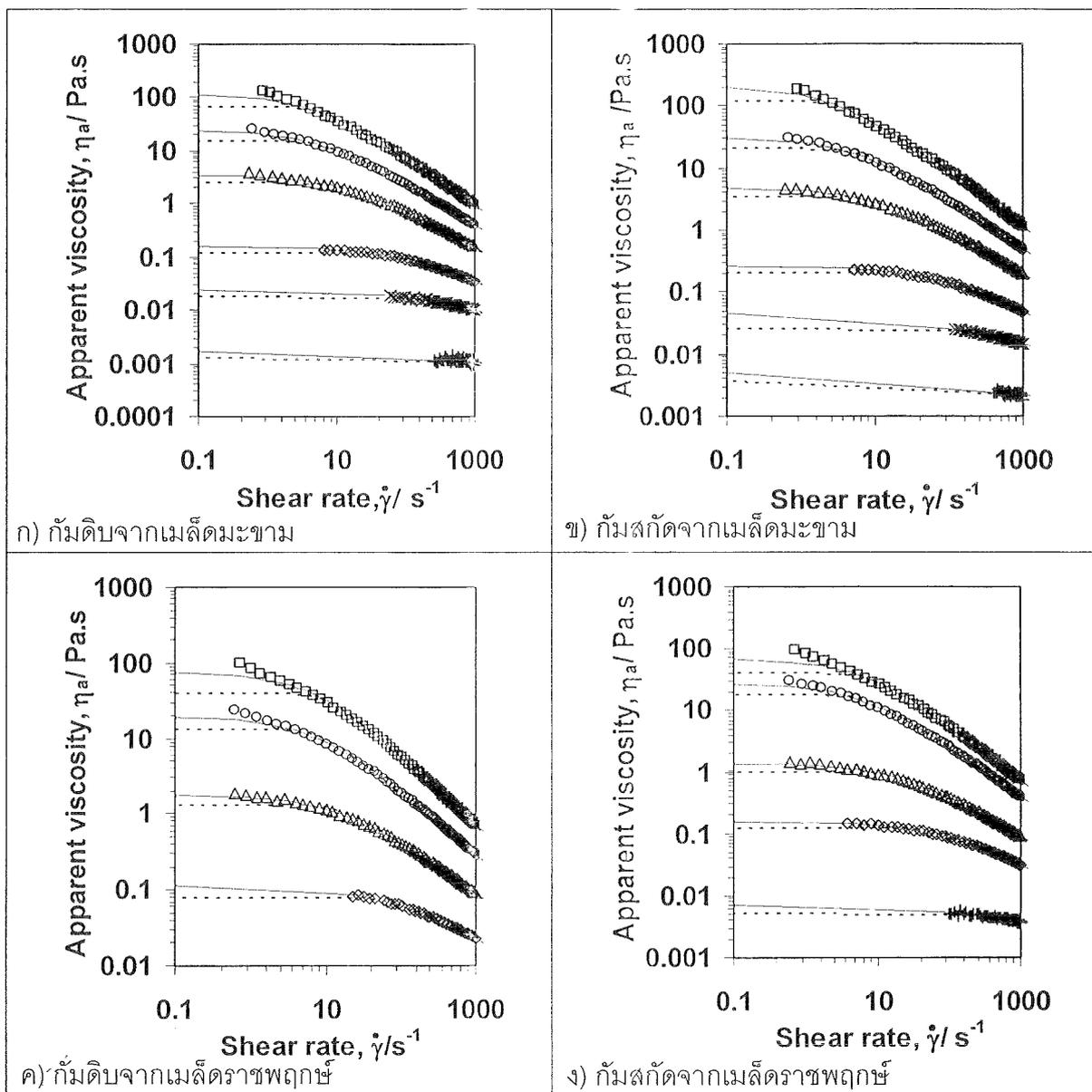
สำหรับพฤติกรรมการไหลแบบ Shear-thinning ของสารโพลีแซคคาไรด์ทั่วไปนั้น ที่ค่าแรงเฉือนต่ำๆ จะแสดงค่าความหนืด (Zero-shear Viscosity,  $\eta_0$ ) ที่คงที่ ซึ่งสามารถทำนายค่าความหนืดดังกล่าวได้ด้วยสมการของ Cross (1965) (สมการที่ 4.1) และ Carreau (1972) (สมการที่ 4.2) (Ravi and Bhattacharya, 2004)

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{\left[1 + (\tau \dot{\gamma})^m\right]} \quad (4.1)$$

$$\eta_a = \eta_\infty + \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{\left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2\right]^N} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\dot{\gamma}$  คือ แรงเฉือน (ต่อวินาที),  $\eta_a$  คือ ความหนืดปรากฏ (ปาสคาล วินาที),  
 $\eta_\infty$  คือ ความหนืดปรากฏที่แรงเฉือนที่ infinite (ปาสคาล วินาที)  
 $\tau$  และ  $\lambda$  คือ ค่าคงที่เกี่ยวกับเวลา (วินาที),  $m$  และ  $N$  คือ ค่าคงที่ไร้หน่วย

ซึ่งทั้งสองโมเดลสามารถทำนายค่า  $\eta_0$  ได้เป็นอย่างดี (ดังแสดงในรูปที่ 4.2) โดยดูได้จากค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (RE) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ที่แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า  $\eta_0$  ด้วยโมเดลทั้งสอง พบว่าโมเดลของ Cross (1965) จะสามารถทำนายค่า  $\eta_0$  ได้ดีกว่าโมเดลของ Carreau (1972)



รูปที่ 4.2 การทำนายค่า  $\eta_0$  จาก Flow Curves ของสารละลายตัวอย่างที่ร้อยละความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ก) 0.22 (-), 0.33 (+), 0.67 ( $\times$ ), 1.15 ( $\diamond$ ), 2.30 ( $\Delta$ ), 2.75 (O), 5.70 ( $\square$ ); (ข) 0.30 (+), 0.79 ( $\times$ ), 1.31 ( $\diamond$ ), 2.72 ( $\Delta$ ), 4.01 (O), 6.82 ( $\square$ ); (ค) 0.60 ( $\diamond$ ), 1.10 ( $\Delta$ ), 1.90 (O), 3.40 ( $\square$ ); (ง) 0.22 (+), 0.65 ( $\diamond$ ), 1.09 ( $\Delta$ ), 2.17 (O), 3.06 ( $\square$ ) เส้นที่บแสดงการทำนายค่า  $\eta_0$  จากโมเดลของ Cross (1965) และเส้นประแสดงการทำนายค่า  $\eta_0$  จากโมเดลของ Carreau (1972)

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ได้จากการทำนายค่า  $\eta_0$  จากโมเดลของ Cross (1965) สำหรับสารละลายกัมตัวอย่างจากเมล็ดมะขาม และเมล็ดราชพฤกษ์

ตัวอย่าง	ร้อยละความเข้มข้น	$\eta_0$ (Pa.s)	$\tau$ (s)	m	RE*	
เมล็ดมะขาม	กัมดิบ	0.33	0.0046	0.0016	0.20	0.046
		0.67	0.023	0.0016	0.58	0.0091
		1.15	0.15	0.0064	0.67	0.0040
		2.30	3.45	0.097	0.79	0.0086
		2.57	24.22	0.15	0.81	0.0329
	5.70	111.41	0.20	0.89	0.041	
	กัมสกัด	0.79	0.047	0.0059	0.45	0.0073
		1.31	0.26	0.0092	0.67	0.0056
		2.72	4.93	0.072	0.74	0.011
		4.01	32.40	0.18	0.80	0.0098
6.28		212.36	0.36	0.88	0.025	
เมล็ดราชพฤกษ์	กัมดิบ	0.60	0.11	0.0078	0.66	0.0048
		1.10	1.81	0.049	0.75	0.0061
		1.90	19.60	0.12	0.86	0.012
		3.40	74.56	0.14	0.94	0.0134
	กัมสกัด	0.22	0.0074	0.0008	0.33	0.03
		0.65	0.16	0.008	0.67	0.004
		1.09	1.38	0.036	0.73	0.0062
		2.17	27.38	0.14	0.84	0.013
		3.06	66.86	0.14	0.91	0.021

$$*RE, \text{ relative deviation error} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\eta_{\text{exp},i} - \eta_{\text{cal},i}}{\eta_{\text{exp},i}} \right| / n$$

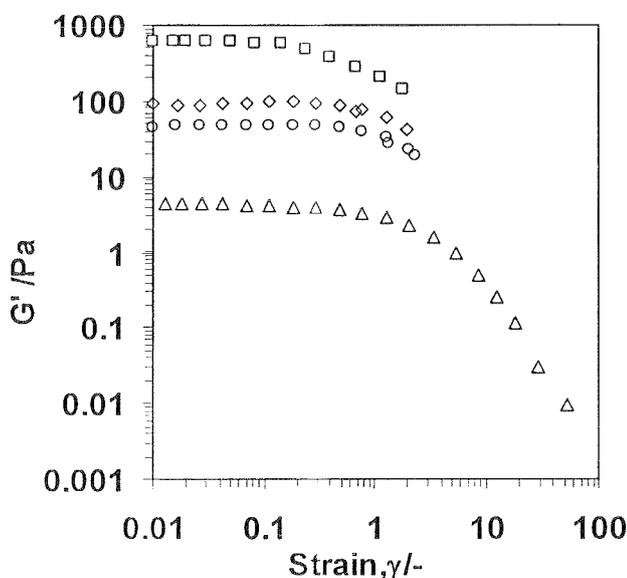
ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ได้จากการทำนายค่า  $\eta_0$  จากโมเดลของ Carreau (1972) สำหรับสารละลายกัม ตัวอย่างจากเมล็ดมะขาม และเมล็ดราชพฤกษ์

ตัวอย่าง	ร้อยละความเข้มข้น	$\eta_0$ (Pa.s)	$\lambda$ (s)	N	RE*	
เมล็ดมะขาม	กัมดิบ	0.22	0.0013	0.041	0.032	0.067
		0.33	0.0027	0.0027	0.10	0.043
		0.67	0.018	0.007	0.15	0.01
	กัมสกัด	1.15	0.12	0.014	0.23	0.013
		2.30	2.54	0.06	0.33	0.033
		2.57	15.53	0.12	0.38	0.032
		5.70	70.20	0.15	0.43	0.041
เมล็ดราชพฤกษ์	กัมดิบ	0.79	0.026	0.0057	0.0168	0.0061
		1.31	0.208	0.0185	0.245	0.0171
		2.72	3.6688	0.080	0.330	0.034
		4.01	21.340	0.140	0.379	0.030
	กัมสกัด	6.28	126.65	0.255	0.421	0.039
		0.60	0.082	0.014	0.024	0.0086
		1.10	1.38	0.059	0.33	0.032
เมล็ดราชพฤกษ์	กัมดิบ	1.90	13.67	0.11	0.40	0.035
		3.40	41.76	0.13	0.45	0.033
		0.22	0.0054	0.008	0.080	0.030
	กัมสกัด	0.65	0.13	0.019	0.239	0.017
		1.09	1.06	0.048	0.31	0.031
		2.17	18.50	0.122	0.400	0.035
3.06	66.88	0.14	0.91	0.089		

$$*RE, \text{ relative deviation error} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\eta_{\text{exp}, i} - \eta_{\text{cal}, i}}{\eta_{\text{exp}, i}} \right|}{n}$$

#### 4.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายกัมต้วต่อคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก

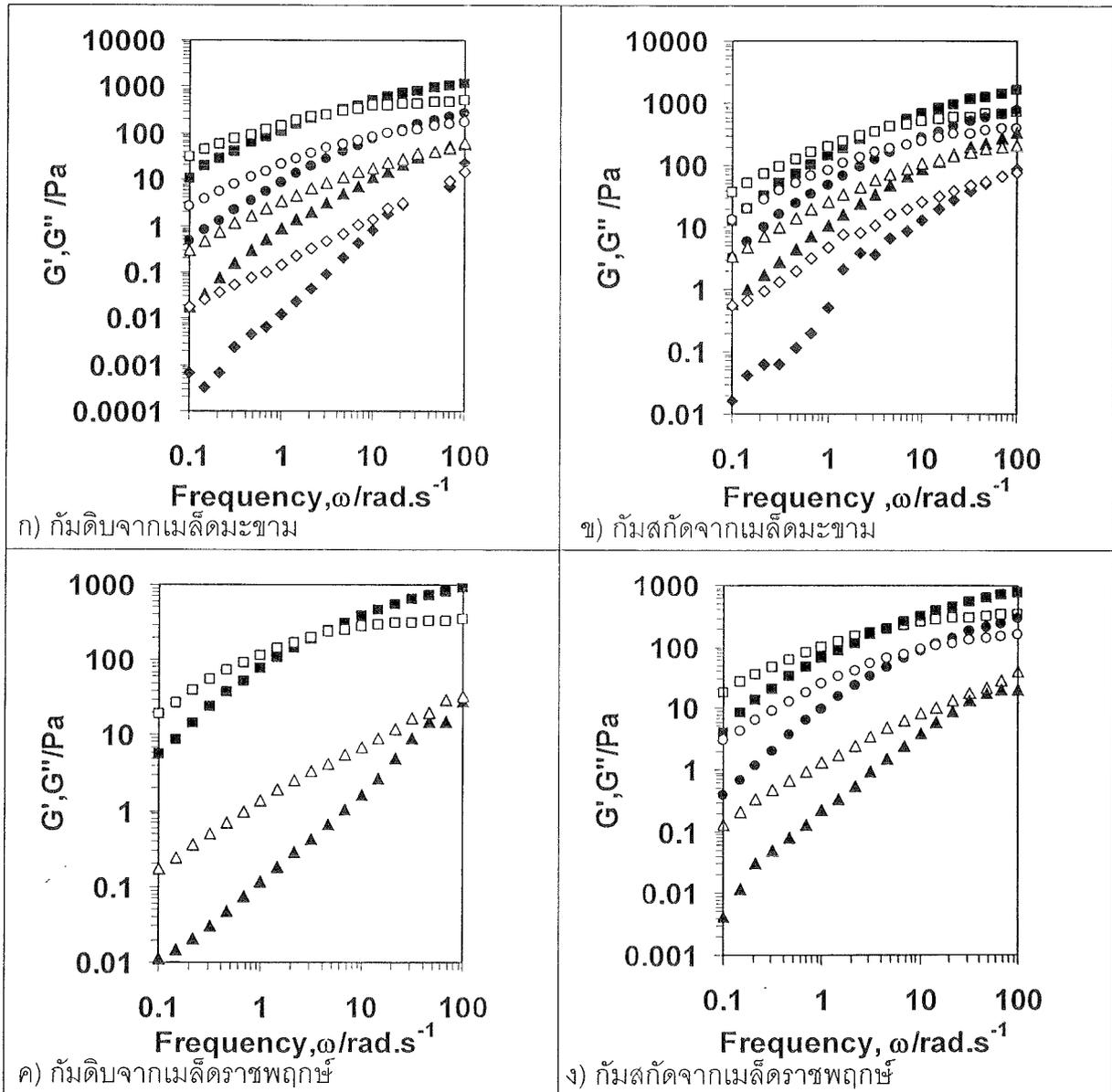
คุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของสารละลายกัมต้วอย่างสามารถทดสอบได้ ภายหลังจากที่ทราบช่วงวิสโคอีลาสติกเส้นตรง (Linear Viscoelastic Zone) ของแต่ละความเข้มข้นของสารละลายกัมต้วอย่าง ซึ่งบางตัวอย่างของสารละลายกัมต้วแสดงดังในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าช่วงวิสโคอีลาสติกเส้นตรงของทุกความเข้มข้นของสารละลายกัมต้วอย่างจะอยู่ในช่วงร้อยละ 0.01- 0.1 ของค่า Strain



รูปที่ 4.3 ช่วงวิสโคอีลาสติกเส้นตรงของสารละลายกัมต้วอย่างที่ร้อยละความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 2.30 ของกัมต้วจากเมล็ดมะขาม ( $\Delta$ ), 3.80 ของกัมต้วสกัดจากเมล็ดมะขาม ( $\circ$ ), 3.40 ของกัมต้วจากเมล็ดราชพฤกษ์ ( $\square$ ), 2.17 ของกัมต้วสกัดจากเมล็ดราชพฤกษ์ ( $\diamond$ )

คุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของสารละลายประเภทโพลีแซคคาไรด์ โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 ประเภท คือสารละลายเจือจาง (Dilute Solution) สารละลายเข้มข้น (Concentrated Solution) เจลอ่อน (Weak Gel) เจลแข็ง (Strong Gel) โดยสามารถแบ่ง และอธิบายคุณสมบัติดังกล่าวในแต่ละประเภทได้จากค่า  $G'$  (Storage Modulus) และค่า  $G''$  (Loss Modulus) (Xu, Liu, and Zhang, 2006) ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 2.6.3 สำหรับรูปที่ 4.4 แสดงการพล็อตระหว่างค่า  $G'$ ,  $G''$  กับค่าความถี่ สำหรับสารละลายกัมต้วอย่างที่ร้อยละความเข้มข้นต่างๆ ที่ค่า Strain เท่ากับ 0.08 (เป็นค่าที่อยู่ในช่วงวิสโคอีลาสติกเส้นตรง) และวัดที่อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ที่ร้อยละความเข้มข้นต่ำๆ สารละลายกัมต้วจะแสดงพฤติกรรมแบบสารละลาย (Liquid Like Behaviour) ( $G'' > G'$ ) และพฤติกรรมจะค่อยๆ เปลี่ยนไปเป็นแบบเจลอ่อนที่ร้อยละความเข้มข้นสูงขึ้น โดยดูได้จากค่า  $G' > G''$  นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อความเข้มข้นของกัมต้วอย่างเพิ่มขึ้นจุดตัด ( $G'' = G'$ ) จะเกิดเร็วขึ้น (ความถี่

ต่ำลง) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Salazae-Montoya และคณะ (2002) และ Ahmed และคณะ (2007) ที่ทำการทดลองกับน้ำมันมะขามที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยพบว่า ที่ช่วงความถี่ต่างๆ ค่า  $G'' \gg G'$  ในขณะที่ช่วงความถี่สูงๆ ค่า  $G'' \ll G'$



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของสารละลายกัมตัวอย่างที่ร้อยละความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิ (ก) 1.15 ( $\diamond$ ), 2.30 ( $\Delta$ ), 2.75 (O), 5.70 ( $\square$ ); (ข) 2.72 ( $\diamond$ ), 4.01 ( $\Delta$ ), 5.54 (O), 6.82 ( $\square$ ); (ค) 1.10 ( $\Delta$ ), 3.40 ( $\square$ ); (ง) 1.09 ( $\Delta$ ), 2.17 (O), 3.06 ( $\square$ ); สัญลักษณ์ทึบสำหรับ  $G'$  สัญลักษณ์โปร่งสำหรับ  $G''$