บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย

จากการเตรียม poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) จากปฏิกิริยาระหว่าง acrylamide 0.03 โมล กับ ethylene glycol dimethacrylate 0.003 โมล ในสารละลายคลอโรฟอร์ม 25 มล. โดยใช้ benzoyl peroxide 0.1 กรัม เป็นตัวริเริ่ม กวนด้วยความเร็วในการกวน 210 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 5 นาที เติมปุ๋ยยูเรีย กวนต่อจนตัวทำละลายควบแน่นจนหมด จนเกิดโคพอลิเมอร์โครงข่ายตาข่ายห่อหุ้มยูเรีย เมื่อใช้ปริมาณปุ๋ยยูเรียต่างๆ กัน คือ 10, 15, 20 และ 25 กรัม นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C จากผลการทดลองข้อ 3.2.2 น้ำหนักพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย ปริมาณยูเรียที่ถูกห่อหุ้มและเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มแสดงใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย ปริมาณยูเรียที่ถูกห่อหุ้มและ %ห่อหุ้มใน poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) ที่ห่อหุ้มยูเรีย 10,15, 20 และ 25 กรัม

ปริมาณยูเรีย (กรัม)	น้ำหนักพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (กรัม)	ปริมาณยูเรียที่ถูกห่อหุ้ม (กรัม)	% การห่อหุ้ม
10	11.74	6.90	58.77
15	17.39	10.63	61.13
20	21.54	13.13	60.96
25	26.00	15.29	58.81

ปริมาณยูเรียต่างๆที่ใช้ จะได้ร้อยละห่อหุ้มยูเรียมากที่สุด คือ เมื่อใช้ยูเรีย 15 กรัมซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 20 กรัม รองลงมา คือ 10 กรัมมีค่าใกล้เคียงกับ 15 กรัม เนื่องปริมาณ % ห่อหุ้มยูเรียในการใช้ปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ปริมาณต่างๆไม่แตกต่างกันมากนัก จึงทำการศึกษาตัวแปรอื่นต่อไป

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของ poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียเมื่อใช้ปริมาณปุ๋ยยูเรียต่างๆ กัน คือ 10, 15, 20 และ 25 กรัม พบว่าบนพื้นผิวเม็ดยูเรียมี poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) ห่อหุ้มอยู่เป็นลักษณะวุ้นสีขาวใส ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะ poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย 10, 15, 20 และ 25 กรัม

ปริมาณยูเรีย (กรัม)	ลักษณะ poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate)
10	- มีขนาดประมาณ 2.0 - 5.0 มม.ขึ้นกับขนาดของเม็ดปุ๋ยยูเรียมีลักษณะกลมเป็นเม็ดยูเรียอยู่ด้านใน และมีลักษณะยืดหยุ่นสีใสอยู่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก - หลังจากอบแล้วด้านนอกมีสีขาว มีการห่อหุ้มหนารูปร่างเป็นเม็ดกลม ผิวเรียบถึงขรุขระ
15	- มีขนาดประมาณ 2.0 - 4.3 มม. ขึ้นกับขนาดของเม็ดปุ๋ยยูเรีย มีลักษณะกลมเป็นเม็ดยูเรียอยู่ด้านใน และมีลักษณะยืดหยุ่นสีใสอยู่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก - หลังจากอบแล้วด้านนอกมีสีขาว มีการห่อหุ้มหนาเล็กน้อย ผิวเรียบและขรุขระเล็กน้อย
20	- มีขนาดประมาณ 1.8 - 4.35 มม. มีลักษณะกลมเป็นเม็ดยูเรียอยู่ด้านในและมีลักษณะยืดหยุ่นสีใสอยู่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก - หลังจากอบแล้วด้านนอกมีสีขาว มีการห่อหุ้มหนาเล็กน้อย รูปร่างเป็นเม็ดกลม ผิวเรียบและมีผิวขรุขระน้อย
25	- มีขนาดประมาณ 1.8 - 4.1 มม. มีลักษณะกลมเป็นเม็ดยูเรียอยู่ด้านในและมีลักษณะยืดหยุ่นสีใสอยู่ห่อหุ้มอยู่ด้านนอก - หลังจากอบแล้วด้านนอกมีสีขาว มีการห่อหุ้มบางรูปร่างเป็นเม็ดกลม ผิวเรียบและขรุขระ

จากการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียด้วยพอลิเมอร์ที่ใช้ปริมาณปุ๋ยยูเรีย 10, 15, 20 และ 25 กรัม พบว่ามีลักษณะโดยทั่วไป คือ สาร poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) ลักษณะเป็นวุ้นสีขาวใสห่อหุ้มเม็ดปุ๋ยยูเรีย มีขนาดประมาณ 2.00-5.00 มม. ผิวเรียบถึงขรุขระ

4.2 การเคลือบพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย

ลักษณะทางกายภาพจากการเคลือบ poly(acrylamide-co-ethylene glycol dimethacrylate) ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียด้วย polystyrene และ wax อย่างละ 1 กรัม และ 2 กรัม ที่ปริมาณยูเรียต่าง ๆ มีผลแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะ พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียปริมาณ 10, 15, 20 และ 25 กรัม ที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม

ปริมาณสารเคลือบ (กรัม)	ปริมาณปุ๋ยยูเรีย ที่ใช้การห่อหุ้ม(กรัม)	ลักษณะที่สังเกตได้
1	10	- มีขนาดประมาณ 2.1 - 4.1 มม. มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ผิวเรียบ
	20	- มีขนาดประมาณ 2.1 - 4.3 มม. มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ผิวเรียบและขรุขระเล็กน้อย เกาะตัวเป็นก้อน 2-3 ก้อน ก้อนละ 3-4 เม็ด
2	10	- มีขนาดประมาณ 2.5 - 4.6 มม. มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ผิวเรียบและขรุขระเล็กน้อย เกาะตัวเป็นก้อน 2-3 ก้อนก้อนละ 2-3 เม็ด
	15	- มีขนาดประมาณ 2.8 - 4.5 มม. มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ผิวเรียบเกาะตัวเป็นก้อน 2-3 ก้อนก้อนละ 2-3 เม็ด
	20	- มีขนาดประมาณ 3.0 - 4.9 มม. มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ผิวเรียบ เกาะตัวเป็นก้อน 2-3 ก้อนก้อนละ 2-3 เม็ด
	25	- มีขนาดประมาณ 2.6- 4.7 มม. มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาว ผิวเรียบและขรุขระ เกาะตัวเป็นก้อน 3-4 ก้อนก้อนละ 5-6 เม็ด

Central Library
Prince of Songkla University

ลักษณะการเคลือบโดยใช้ polystyrene และ wax อย่างละ 1 กรัมในคลอโรฟอร์ม 5 มิลลิลิตรมีการเคลือบไม่สม่ำเสมอ ทำให้พื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ส่วนที่เคลือบโดยใช้สารเคลือบอย่างละ 2 กรัม มีผิวที่เรียบและขรุขระเล็กน้อย ในกรณีแรกมีสารเคลือบน้อยเกินไปจึงทำให้การเคลือบสม่ำเสมอ

ปริมาณเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม จากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัมโดยพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียปริมาณ 10, 15, 20 และ 25 กรัม ทั้งนี้หาปริมาณไนโตรเจนโดยวิธี Kjeldahl และ DMAB methods (ตารางที่ 4.4)

ในปริมาณสารเคลือบ 1 กรัม ได้ทำการสุ่มเลือกปริมาณยูเรียที่ 10 กรัมและ 20 กรัม เป็นตัวทดสอบการควบคุมการปลดปล่อยเปรียบเทียบกับการปลดปล่อยที่ใช้ปริมาณสารเคลือบ 2 กรัม เพื่อหาปริมาณสารเคลือบที่ควบคุมการปลดปล่อยได้ดีที่สุดทำการทดลองศึกษาต่อไป

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัมและ 2 กรัม เมื่อใช้ปุ๋ยยูเรียในปริมาณ 10, 15, 20 และ 25 กรัม

ปริมาณสารเคลือบ (กรัม)	ปริมาณยูเรีย (กรัม)	เปอร์เซนต์การห่อหุ้ม
1	10	46.20
	15	-
	20	56.02
	25	-
2	10	47.38
	15	51.67
	20	49.62
	25	49.63

4.3 ผลของพอลิเมอร์ที่เป็น control

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย

Poly(acrylamide-*co*-ethylene glycol dimethacrylate) ที่เตรียมจากปฏิกิริยาระหว่าง acrylamide 0.03 โมล กับ ethylene glycol dimethacrylate 0.003 โมล ในสารละลายคลอโรฟอร์ม 25 มล. โดยใช้ benzoyl peroxide 0.1 กรัม เป็นตัวริเริ่ม ความเร็วในการกวน 210 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที ทำการกวนต่อจนตัวทำละลายควบแน่นจนหมด จนเกิดเป็นโคพอลิเมอร์โครงข่ายตาข่าย นำไปอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 °C และการเคลือบโคพอลิเมอร์ที่ได้ (ที่ยังไม่ได้นำไปห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย) ด้วย polysteyrene และ wax ในปริมาณ 1 กรัม และ 2 กรัม สรุปในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียและพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ทำการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม

ปริมาณสารเคลือบที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย(กรัม)	ลักษณะที่สังเกตได้
0	- มีลักษณะเกาะตัวกันเป็นยางเหนียวสีใส เมื่อนำไปอบแล้วมีลักษณะเป็นวุ้นยืดหยุ่น สีขาวใสจับตัวเป็นก้อน
1	- สารเคลือบมีสีขาวห่อหุ้มพอลิเมอร์ที่ไม่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย ผิวขรุขระเป็นสารเคลือบเกาะเป็นแห่งๆ บนพอลิเมอร์
2	- สารเคลือบมีสีขาวห่อหุ้มพอลิเมอร์ที่ไม่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย ผิวขรุขระเล็กน้อย

จากการหาปริมาณยูเรียที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียและพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ทำการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม ตลอดจนพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มที่ทำการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม โดยการนำพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่อบแห้งแล้ว 2.0000 $\pm$ 0.0010 กรัม ทำการ reflux เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่า N-Urea โดยวิธี *p*-dimethylaminobenzaldehyde และ Kjeldahl methods สรุปผลในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณยูเรียที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (control) และพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มที่ทำการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม

ปริมาณสารเคลือบ (กรัม)	ปริมาณพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (กรัม)	ปริมาณยูเรียที่พบ (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม
0	9.21	0.12	1.29
1	3.51	0.02	0.68
2	5.78	0.048	0.83

4.4 ศึกษาปริมาณยูเรียในพอลิเมอร์ห่อหุ้มยูเรีย

จากการวัดค่า % การห่อหุ้มของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (control) พบว่าในพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียมีค่าปริมาณยูเรียที่พบเท่ากับ 0.12 กรัม ดังนั้นปริมาณร้อยละยูเรียที่ห่อหุ้มได้จริงแสดงผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณยูเรียที่มีอยู่จริงในพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย

ปริมาณสารเคลือบ (กรัม)	ปริมาณยูเรียเริ่มต้นที่ใส่เข้าไป (กรัม)	เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้ม
0	10	57.53
	15	59.79
	20	59.66
	25	57.54
1	10	45.51
	15	-
	20	55.33
	25	-
2	10	46.55
	15	50.84
	20	48.79
	25	48.80

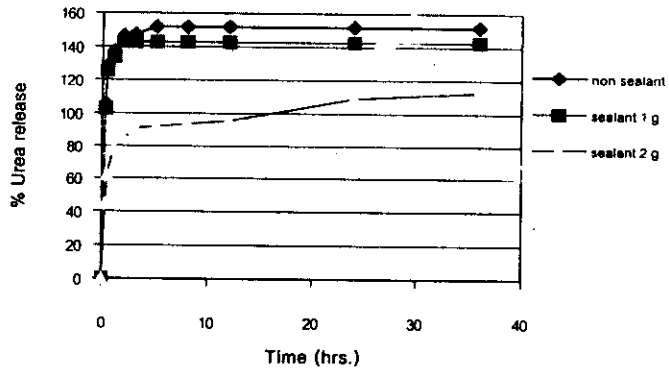
จากการทดลองการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียด้วยพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มยูเรียและผ่านการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม พบว่า จากพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ใช้ปริมาณ 15 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มสูงที่สุด คือ 59.79 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ใช้ปุ๋ยยูเรียปริมาณ 20 กรัม คือ 59.66 เปอร์เซนต์ รองลงมา คือ ปริมาณยูเรีย 25 กรัม และ 10 กรัมซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 57.54 และ 57.53 ตามลำดับ และจากพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มยูเรียและผ่านการเคลือบ 2 กรัม พบว่า จากพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ที่ใช้ปริมาณยูเรีย 15 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มสูงที่สุด คือ 50.84 รองลงมา คือ ที่ใช้ปุ๋ยยูเรียปริมาณ 25 และ 20 กรัม ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มยูเรียใกล้เคียงกัน คือ 48.80 48.79 ตามลำดับ และที่ปริมาณยูเรีย 10 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มน้อยสุด คือ 46.55

4.5 ศึกษาการปลดปล่อยยูเรีย

4.5.1 การปลดปล่อยยูเรียที่ pH 5

การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 57.53 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 10 กรัม) และพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม (% การห่อหุ้ม 45.51 และ 46.55 ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 10 กรัม) ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.1) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 57.53) มีอัตราการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 2 ชั่วโมง และพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม (% การห่อหุ้ม 45.51) มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 2 ชั่วโมง เช่นกัน พอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม (% การห่อหุ้ม 46.55) มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 24 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 57.53) มีการปลดปล่อยเร็วที่สุด รองลงมา คือ พอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม (% การห่อหุ้มที่ 45.51) และ พอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม (% การห่อหุ้มที่ 46.55) มีอัตราการปลดปล่อยช้าที่สุดจึงเลือกที่จะใช้สารเคลือบปริมาณ 2 กรัม ทำการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรอื่นต่อไป

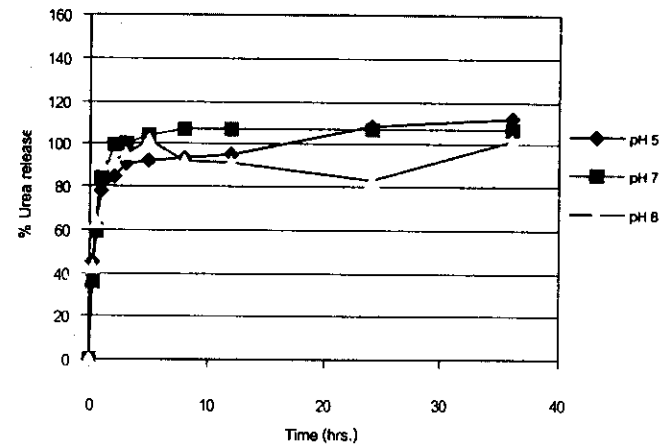
สำหรับกรณีที่เปอร์เซนต์การปลดปล่อยเกิน 100% นั้น เนื่องจากโคพอลิเมอร์ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้เป็นสารห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียเป็นสารประกอบพวกพอลิเอไมด์ ซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ และในการศึกษาการปลดปล่อยยูเรียได้หาในรูป $N\text{-}NH_3$ ก่อนแล้วจึงคำนวณย้อนกับเป็นปริมาณยูเรีย ดังนั้นในกระบวนการศึกษาการปลดปล่อยจึงเป็นไปได้ว่ามีปริมาณไนโตรเจนบางส่วนมาจากโคพอลิเมอร์ดังกล่าวด้วย



รูปที่ 4.1 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ปริมาณยูเรีย 10 กรัม และพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ปริมาณ 10 กรัม ที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม และ 2 กรัม ในสารละลาย pH 5 ที่อุณหภูมิห้อง

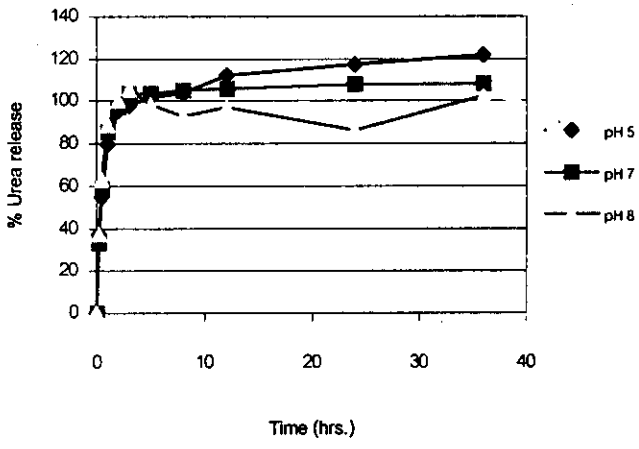
4.5.2 การปลดปล่อยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5, pH 7 และ pH 8

การปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยยูเรียที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ (%ห่อหุ้ม 46.55 เมื่อใช้ยูเรีย 10 กรัม) ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5, pH 7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.2) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 24 ชั่วโมง ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 8 ชั่วโมง และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 2 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีอัตราการปลดปล่อยช้าที่สุด รองลงมาคือ สารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 และสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 ตามลำดับ



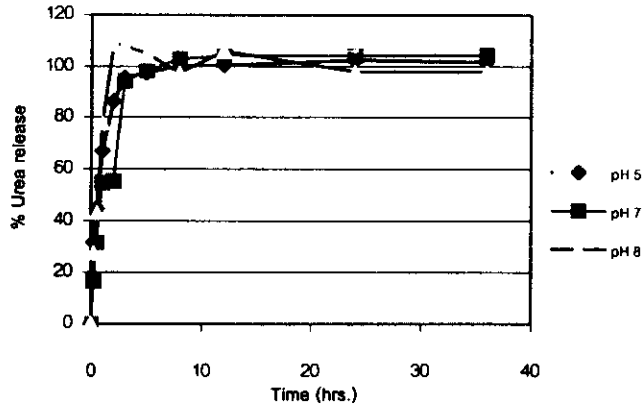
รูปที่ 4.2 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 46.55 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 10 กรัม) ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5, pH7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง

การปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยยูเรียที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ (%ห่อหุ้ม 50.84 เมื่อใช้ปริมาณ 15 กรัม) ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5, pH 7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.3) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 12 ชั่วโมง ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 3 ชั่วโมง และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 2 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีอัตราการปลดปล่อยช้าที่สุด รองลงมาคือ สารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 และสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.3 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 50.84 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 15 กรัม) ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5, pH7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง

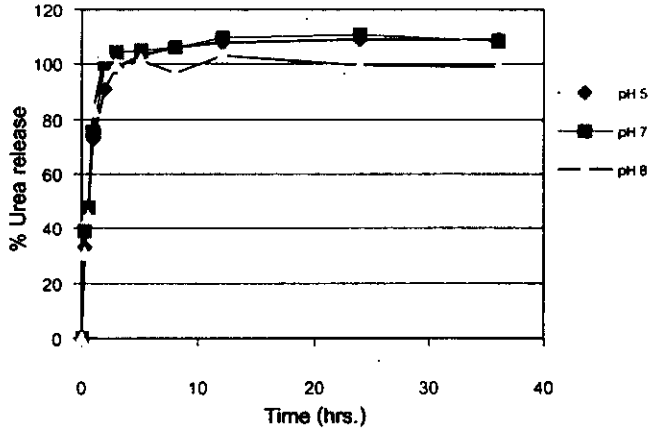
การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 48.79 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 20 กรัม) ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5, pH 7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 48.79 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 20 กรัม) ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5, pH7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง

พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 8 ชั่วโมง ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 8 ชั่วโมง และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 2 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีอัตราการปลดปล่อยช้าที่สุด รองลงมาคือ สารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 และสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 ตามลำดับ

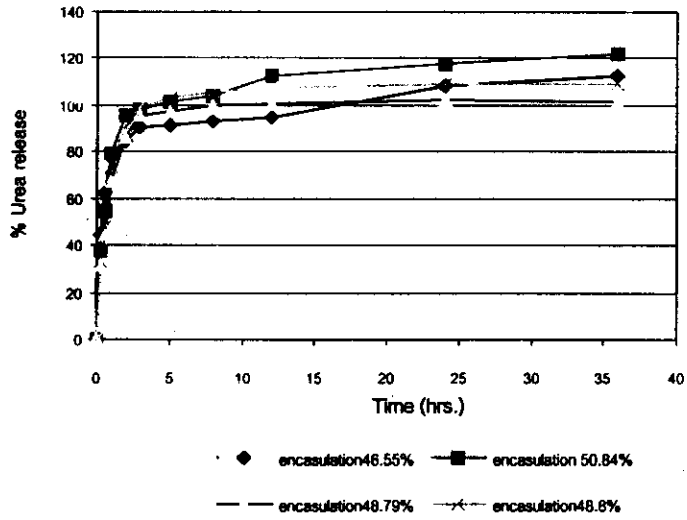
การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 48.80 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 25 กรัม) ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5, pH7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง(รูปที่ 4.5) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 8 ชั่วโมง ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 3 ชั่วโมง และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 มีปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 2 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 มีอัตราการปลดปล่อยช้าที่สุด รองลงมาคือ สารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 และสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.5 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (% การห่อหุ้ม 48.80 เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 25 กรัม) ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5, pH7 และ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง

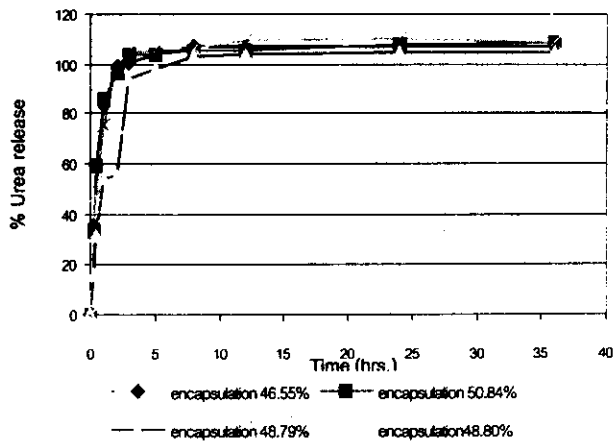
4.5.3 การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม

การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ % การห่อหุ้ม 46.55, 50.84, 48.79 และ 48.80 เมื่อใช้ยูเรีย 10, 15, 20 และ 25 กรัม ตามลำดับ ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.6) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ % การห่อหุ้ม 46.55 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 24 ชั่วโมง ที่ % การห่อหุ้ม 50.84 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 2 ชั่วโมง, ที่ % การห่อหุ้ม 48.79 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 8 ชั่วโมง, และที่ % การห่อหุ้ม 48.80 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 8 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย คือ ที่ % การห่อหุ้ม 50.84>48.79 ≅ 48.80> 46.55 ตามลำดับ



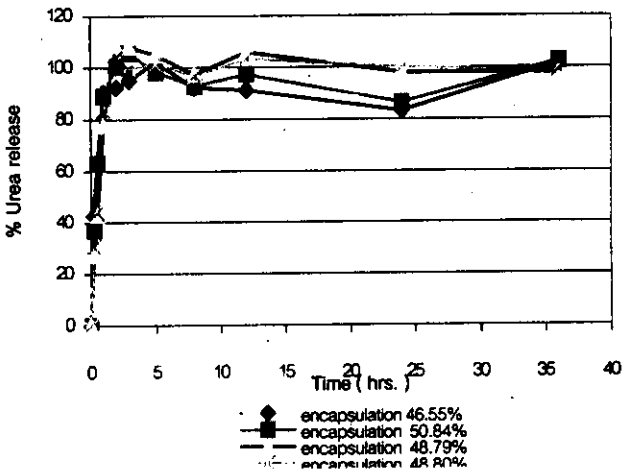
รูปที่ 4.6 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5 ที่อุณหภูมิห้อง

การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ % การห่อหุ้ม 46.55, 50.84, 48.79 และ 48.80 เมื่อใช้ยูเรีย 10, 15, 20 และ 25 กรัม ตามลำดับ ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.7) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ % การห่อหุ้ม 46.55, 50.84 และ 48.79 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 3 ชั่วโมง, และที่ % การห่อหุ้ม 48.80 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายในเวลา 8 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย คือ ที่ % การห่อหุ้ม 46.55 = 50.84 = 48.84 > 48.79 ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง

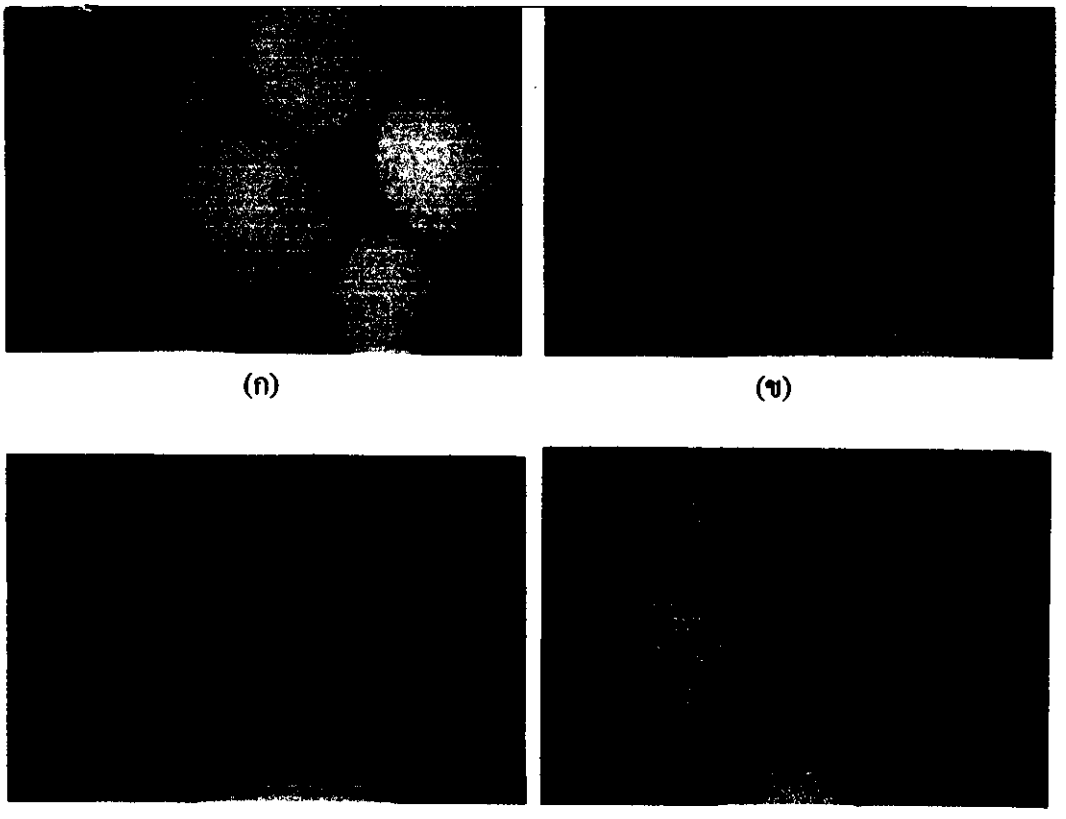
การปลดปล่อยยูเรียจากพอลิเมอร์ที่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ % การห่อหุ้ม 46.55, 50.84, 48.79 และ 48.80 เมื่อใช้ยูเรีย 10, 15, 20 และ 25 กรัม ตามลำดับ ที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 4.8) พบว่าการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียในช่วง 1 ชั่วโมงแรกมีลักษณะการปลดปล่อยที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเวลาผ่านไปพบว่าที่ % การห่อหุ้ม 46.55 และ 50.84 มีลักษณะการปลดปล่อยยูเรียมีค่าใกล้เคียงกัน และที่ % การห่อหุ้ม 48.79 และ 48.80 มีลักษณะการปลดปล่อยยูเรียมีค่าใกล้เคียงกัน และตัวอย่างทั้ง 4 มีการปลดปล่อยยูเรียหมดภายใน 2 ชั่วโมง และอัตราการปลดปล่อยจากพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย คือ ที่ % การห่อหุ้ม 48.79 = 48.84 > 50.84 > 46.55 ตามลำดับ



รูปที่4.8 การปลดปล่อยยูเรียของพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 8 ที่อุณหภูมิห้อง

4.6 ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย

เมื่อพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (%polymer-encapsulated urea เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 10 กรัม) ที่การควบคุมการปลดปล่อยได้ดีที่สุด มาศึกษาลักษณะภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอไมโครสโคปที่กำลังขยาย 2.5 เท่า (รูปที่ 4.9) พบว่าเม็ดปุ๋ยยูเรีย (ดังรูป ก) มีลักษณะผิวเรียบ ลักษณะผิวของพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (ดังรูป ข) พบว่ามีลักษณะผิวที่ขรุขระเป็นลักษะยางเหนียวห่อหุ้มเม็ดปุ๋ย, ลักษณะพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม (ดังรูป ค) พบว่ามีการเคลือบพอลิเมอร์ ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียอย่างไม่สม่ำเสมอ และที่พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม (ดังรูป ง) พบว่า มีการเคลือบอย่างสม่ำเสมอ



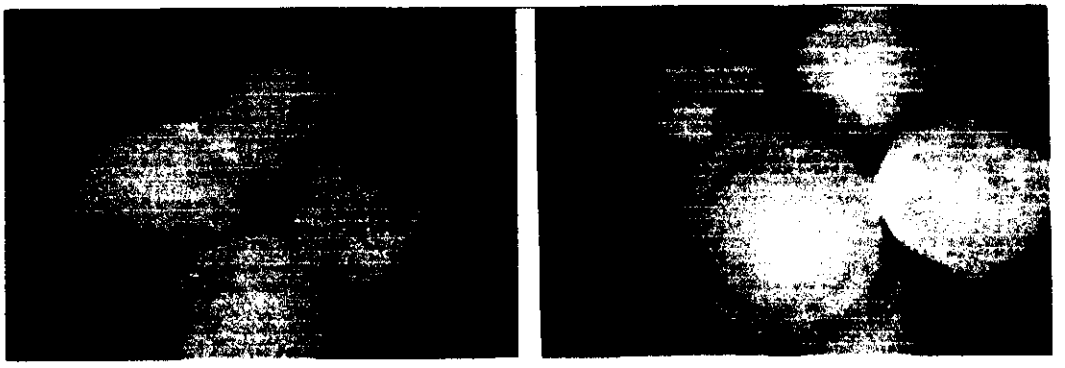
(ก) (ข)

(ค) (ง)

(ค) (ง)

รูปที่ 4.9 ลักษณะทางกายภาพภายนอกที่กำลังขยาย 2.5 เท่า (ก) เม็ดปุ๋ยยูเรีย (ข) พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (ค) พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม (ง) พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม

เมื่อพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย (%polymer-encapsulated urea เมื่อใช้ปริมาณยูเรีย 10 กรัม) ที่การควบคุมการปลดปล่อยได้ดีที่สุดมาศึกษาลักษณะภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสเตอริโอไมโครสโคปที่กำลังขยาย 2.5 เท่า (รูปที่ 4.9) พบว่าพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียมีลักษณะเป็นยางยืดห่อหุ้มเม็ดปุ๋ยยูเรีย (ดังรูป ก) และพอลิเมอร์ห่อหุ้มยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม (ดังรูป ข) พบว่า มีลักษณะสารเคลือบเม็ดปุ๋ยอยู่ 2 ชั้น และมีความหนาในการเคลือบไม่สม่ำเสมอกันต่างกับที่การเคลือบพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม (ดังรูป ค) พบว่า มีการเคลือบหนาอย่างสม่ำเสมอกว่า



(ก)

(ข)

(ค)

(ค)

รูปที่ 4.10 ลักษณะทางกายภาพภายในที่กำลังขยาย 2.5 เท่า (ก) พอลิเมอร์ห่อหุ้ม (ข) พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 กรัม (ค) พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 2 กรัม

วิจารณ์ผลการทดลอง

การเตรียมพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย จากการทดลองโดยใช้ปริมาณยูเรียที่ถูกห่อหุ้มในปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 10, 15, 20, และ 25 กรัม พบว่า พอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียส่วนใหญ่มีลักษณะยืดหยุ่นสีขาวใสผิวเรียบถึงขรุขระ และปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ใช้มีผลต่อการห่อหุ้มของพอลิเมอร์ต่างกัน คือ ที่ปริมาณยูเรีย 15 และ 20 กรัม มีเปอร์เซนต์การห่อหุ้มใกล้เคียงกัน คือ 59.79 และ 59.66 ตามลำดับ และที่ปริมาณยูเรีย 10 และ 25 กรัม มีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มที่ใกล้กัน คือ 57.53 และ 57.54 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ผลต่อการสร้างโครงร่างตาข่าย คือ ที่ปริมาณยูเรียที่ระดับหนึ่งจะทำให้การเกิดพอลิเมอร์ปริมาณหนึ่ง คือ ที่ปริมาณยูเรีย 15 และ 25 กรัม จะมีการเกิด

พอลิเมอร์ขึ้นมาห่อหุ้มในปริมาณหนึ่ง เมื่อใช้ปริมาณปุ๋ยยูเรียยูเรีย 10 กรัม ทำให้ความสามารถในการเกิดพอลิเมอร์มากกว่าทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายหาห่อหุ้มยูเรียได้มาก และที่ปริมาณปุ๋ยยูเรีย 25 กรัม ทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายน้อยเนื่องจากปริมาณปุ๋ยยูเรียที่มากทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายได้ไม่ดี และพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียลักษณะที่บางกว่าในการใช้ปริมาณปุ๋ยยูเรียอื่นๆ ที่ทำการทดลองและพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะไม่ทำการห่อหุ้มปุ๋ยแต่จะจับตัวเป็นกลุ่มพอลิเมอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Abraham และ Pillai (1996) พบว่า การห่อหุ้มยูเรียด้วยพอลิเมอร์แบบวิธี free radical polymerization จะมีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มอยู่ในช่วง 81 – 88 เปอร์เซ็นต์ แต่ในการผลการทดลองจริงมีเพียง 57 – 60 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากสารตัวทำละลายเกิดการควบแน่นไม่หมดจึงเกิดพอลิเมอร์ไม่เต็มที่หรือยูเรียอาจสูญเสียไปในขั้นตอนการล้างโดพอลิเมอร์

เมื่อทำการเคลือบด้วย polystyrene และ wax อย่างละ 1 และ 2 กรัม พบว่า ที่ปริมาณ 2 กรัม มีการปลดปล่อยยูเรียออกมาช้ากว่าเคลือบด้วย 1 กรัม เนื่องจากการเคลือบมีลักษณะผิวที่เหมาะสมกว่า คือ มีลักษณะเรียบและเคลือบผิวพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียได้ทั่วถึงกว่า

เมื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียที่ผ่านการเคลือบ พบว่า เปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มยูเรียอยู่กับเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียด้วยพอลิเมอร์ซึ่งมีลักษณะแปรผันตามกันและเมื่อมีเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มอยู่มากแสดงว่ามีปริมาณพอลิเมอร์ห่อหุ้มยูเรียอยู่น้อยเมื่อทำการปลดล่อยทำให้เกิดการปลดปล่อยยูเรียออกมาอย่างช้าๆ เมื่อศึกษาการปลดปล่อยในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH ต่าง ๆ พบว่า ที่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 มีการปลดปล่อยออกมาช้าที่สุดและมีการเวลาในการปลดปล่อยนานที่สุด รองลงมา คือ pH 7 และ pH 8 อาจเนื่องจากปุ๋ยยูเรียมีสมบัติเป็นเบสจึงสามารถละลายในสารละลายที่เป็นเบสได้ดีกว่าสารละลายที่เป็นกลางและ กรด ทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนสาร หรือเกิดการแพร่ได้ดีกว่าในสารลายที่เป็นเบสด้วยกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องของปุณฑริก (2544) พบว่าที่สารละลายที่เป็นกรดจะมีการปลดปล่อยได้เร็วกว่าในสารละลายที่เป็นเบส จึงกล่าวได้ว่าความามารถในการปลดปล่อยยูเรียขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาห่อหุ้มปุ๋ยยูเรีย และจากผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Shavit และคณะ (1994) ได้พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการแทรกซึมของน้ำและสารที่ปลดปล่อย คือ ชนิดของปุ๋ย (ความสามารถในการละลาย, ความหนาแน่น) ชนิดของสารที่ห่อหุ้ม, ความเข้มข้นของสารเคลือบ, ขนาดของสารเคลือบและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิด มีผลต่อการปลดปล่อยปุ๋ย

ค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเนื่องจากสารที่ใช้ทดสอบปริมาณยูเรียในการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การห่อหุ้มและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยเป็นสารคนละบริษัทกันจึงทำให้ผลอาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้ และในการสุ่มตัวอย่างนำมาวัดค่าปริมาณยูเรียอาจไม่ดีพอทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนได้

จากการศึกษาลักษณะภายนอกและภายในของพอลิเมอร์ห่อหุ้มยูเรียที่ปลดปล่อยยูเรียออกมาช้าสุด (% การห่อหุ้ม 46.55 เมื่อใช้ยูเรีย 10 กรัม) ด้วยกล้องสเตอริโอไมโครสโคปที่กำลังขยาย 2.5 เท่า พบว่าลักษณะภายนอกที่ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียมีลักษณะผิวขรุขระสีขาวใสและลักษณะภายในมีลักษณะพอลิเมอร์ชั้นบาง ๆ ห่อหุ้มเม็ดปุ๋ยยูเรีย พอลิเมอร์ห่อหุ้มยูเรียที่ผ่านการเคลือบ 1 และ 2 กรัม จากลักษณะภายนอก พบว่าที่ใช้สาเคลือบอย่างละ 1 กรัมมีลักษณะผิวขรุขระและเคลือบผิวพอลิเมอร์ห่อหุ้มปุ๋ยยูเรียไม่ทั่วถึงต่างกับที่ 2 กรัม จะมีลักษณะเรียบ และลักษณะภายในเป็นเยื่อห่อหุ้มเม็ดยูเรีย 2 ชั้น แต่ที่ปริมาณ สารเคลือบ 2 กรัม มีความหนาสม่ำเสมอกว่า 1 กรัม