



เอกสารอ้างอิง

กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์: กรุงเทพฯ.

การแตกตัวของเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ เข้าถึงได้จาก http://discovery.kcpc.usyd.edu.au/discovery/9.2.1/9.2.1_FRP.html. (วันที่สืบค้น 4 มีนาคม 2552).

การแบ่งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เข้าถึงได้จาก <http://library.dip.go.th> วันที่สืบค้น 4 มีนาคม 2552).

โครงสร้างของหน่วยกลูโคส เข้าถึงได้จาก <http://www.jic.ac.uk/STAFF/cliff-hedley/Starch.h-tml>. (วันที่สืบค้น 4 มีนาคม 2552).

โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน. เข้าถึงได้จาก <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html> (วันที่สืบค้น 4 กันยายน 2550).

โครงสร้างทางเคมีของแป้งแอมโพเทอริก เข้าถึงได้จาก <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/AM-ST.htm>. (วันที่สืบค้น 4 มีนาคม 2552).

โครงสร้างของแลกซิดิน. เข้าถึงได้จาก http://www.scientificpsychic.com/fitness/fatty_acids-2.html. (วันที่สืบค้น 4 กันยายน 2550).

โครงสร้างของน้ำตาล. เข้าถึงได้จาก http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/tip/06_04.htm. (วันที่สืบค้น 9 กันยายน 2550).

จิราวรรณ หาญวัฒนกุล. 2546. โฟมพลาสติกชนิดพอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีน เข้าถึงได้จาก http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/bla_4_2550_foams.pdf. (วันที่สืบค้น 2 มีนาคม 2552.).

ปาเจรา พัฒนถาบุตร. 2549. ข่าวพอลิเมอร์. เข้าถึงได้จาก http://www.thaipolymersociety.org/polymernews_5.pdf. (วันที่สืบค้น 4 กันยายน 2550).

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เข้าถึงได้จาก <http://cornbloat.Wordpress.com/2008/11/08/back-on-track%E2%80%94with-plastic>. (วันที่สืบค้น 9 กันยายน 2550).

บุญธรรม นิธิอุทัย และคณะ. 2532. เทคโนโลยีน้ำยางข้น. ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีน้ำยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. วิทยาเขตปัตตานี.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, วิทยาเขตปัตตานี.

ธนาวดี ลีจากภัย. 2549. พลาสติกย่อยสลายได้. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ไทยสตูดิโอ จำกัด: กรุงเทพฯ.

ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม. 2549. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาแนวทางการจัดการผลิตภัณฑ์พลาสติกและโฟม. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. สำนักพิมพ์บุคเนท: กรุงเทพฯ.

อรสา ภัทรไพบุญชัย. 2546. การปรับสภาพยางธรรมชาติเพื่อลดพลังงานที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ยาง. เข้าถึงได้จาก <http://www.trfrubber.com>. (วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2552).

Akamaku, Y., and Tomori, M. 1994. Processing for preparing biodegradable resin foam. US Patent 5,308,879, May 3.

Arvanitoyannis, I., Kolokuris, I., Nakayama, A., and Aiba, S. 1997. Preparation and study of novel biodegradable blends based on gelatinized starch and 1,4-trans-polyisoprene (gutta percha) for food packaging or biomedical applications. Carbohydrate polymer. 34, 291-302.

Averous, L., Moroa, L., Doleb, P., and Fringant, C. 2000. Properties of thermoplastic blends: starch-polycaprolactone. Polymer. 41, 4157-4167.

Basitol, C., Bellotti, V., Lombi, R., and Perego, G. 2003. Thermoplastic compositions comprising starch and other components from natural origin, US Patent 6,506,824, B1, January 14.

Biby, G., Hanna M., and Fang; Q. 2001. Water-resistant degradable foam and method of making the same, US Patent No. 6,184,261, B1. February 6.

Bhathagar S., and Hanna, M.A. 1996. Starch-based plastic foam from various starch source. Engineering and Processing. 73, 601-604.

Bhattacharya, A., and Misra, B.N. 2004. Grafting: a versatile means to modify polymers Techniques factors and applications. Progress in Polymer Science. 29, 767-814.

Biby, G., Hanna M., and Fang; Q. 2001. Water-resistant degradable foam and method of making the same, US Patent No. 6,184,261, B1. February 6.

Boehmer, E.W., and Hanlon, D.L. 1993. Biodegradable expanded foam material. US Patent 5, 272,181, December 21.

- Carvalho, A.J.F., Alvas, A.E., Curvelo, A.A.S., and Gandini, A. 2002. Thermoplastic starch/natural rubber blends. *Carbohydrate polymer*. 53, 95-99.
- Carr, L.G., Parra, DF, Ponce, P, Lugao, A.B., and Buchler, P.M. 2006. Influence of fibers on the mechanical properties of cassava starch foams. *Journal of polymer environment*. 14, 179-183.
- Cha, J.Y., Chung, D.S., Seib, P.A., Flores, R.A., and Hanna, M.A. 2001. Physical properties of starch-based foams as affected by extrusion temperature and moisture content. *Industrial Crops and Products*. 14, 23-30.
- Chen, L., Qiu, X., Xie, Z., Hong, Z., Sun, J., Chen, X., and Jing, X. 2006. Poly(L-lactide)/starch blends compatibilized with poly(L-lactide)-g-starch copolymer. *Carbohydrate Polymers*. 65, 75–80.
- Chi, H., Xu, K., Wu, X., Chen, Q, Xue, D., Song, C, Zhang, W., and Wang, P. 2008. Effect of acetylation on the properties of corn starch. *Food Chemistry* 106, 903-928.
- Cho, C.G., and Lee, K. 2002. Preparation of starch-g-polystyrene copolymer by emulsion polymerization. *Carbohydrate Polymers*. 48, 125–130.
- Choi, W.M., Jung, I.D., Kwon, S.K., Ha, C.S., and Cho, W.J. 1998. Syntheses and photobiodegradable properties of graft copolymers of vinyl ketone and starch. *Polymer Degradation and Stability*. 61, 15-20.
- Cinelli, P., Chiellini, E., Lawton, J.W., and Imam, S.H. 2005. Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly (vinyl alcohol). *Polymer Degradation and Stability*. 91, 1147-1155.
- Danjaji, I.D., Nawang, R., Ishiaku, U.S., Ismail, H., and Ishak, Z.A.M. 2001. Sago starch-filled linear low-density polyethylene (LLDPE) films: their mechanical properties and water absorption. *Journal of Applied. Polymer Science*. 79, 29-37.
- Encyclopedia of polymer science and technology. 2005. John Wiley and Sons, Inc. 1-59.
- Fisk, D.L. 1998. Biodegradable foamed product from a starch graft copolymer. US. Patent 5,853,848, December 29.
- Franke, H. G., and Donald, B. R. 2004. Resilient biodegradable packaging materials, US. Patent 6,805,823, B2, October 19.

- George, V., Britto, I.J., and Sebastian M.S. 2003. Studies on radiation grafting of methyl methacrylate onto natural rubber for improving modulus of latex film, radiation physics and chemistry. 66, 367-372.
- Glenn, G.M., Orts, W.J., and Nobes, G.A.R. 2001a. Starch. Fiber and CaCO₃ effects on the physical properties of foams made by a baking process. Industrial crops and products. 14, 201-212.
- Glenn, G.M., and Orts, W.J. 2001b. Properties of starch-based foam formed by compression/explosion processing. Industrial crops and products. 13, 135-143.
- Gong, Q., Wang, L.Q., and Tu, K. 2006. In situ polymerization of starch with lactic acid in aqueous solution and the microstructure characterization. Carbohydrate Polymers. 64, 501-509.
- Hinchiranan, N., Suppaibulsuk, B., Promprayoon, S., and Prasassarakich, P. 2007. Improving properties of modified acrylic sheet via addition of graft natural rubber. Materials Letters. 61, 3951-3955.
- Hideko, S. 2003. Biodegradable resin composition. JP Patent 041,054, June 3.
- Ho William and Chen L.I., (2006). Biodegradable starch resin and method for making same, US. Patent 7,071,249, July 4.
- Iakada, E. 1999. Electron microscope of biodegradable of polymers. Journal of environment polymer degradation. 7, 197-201.
- Jane J.L., Schwabacher, A. W., Ramrattan, Sam, N., and Moore, J.A. 1992. Biodegradable starch plastics incorporating modified polyethylene, US. Patent 5,115,000, May 19.
- Kaewtatip, K., and Tanrattanakul, V. 2008. Preparation of cassava starch grafted with polystyrene by suspension polymerization. Carbohydrate Polymers. 73, 647-655.
- Kakinoki, H., and Sato, H. 1998. Foam-expanded material. US Patent 5,766,749, June 16.
- Kangwansupamonkon, W., Christopher, M.F., David, J.L., and Gilbert, R.G. 2004. Kinetics of surface grafting on polyisoprene latexes by reaction calorimetry. Polymer. 45, 5775-5784.
- Katepetch, C., Rujiravanit, C., and magaraphan, R. 2006. Effect of natural rubber content on morphology and mechanical properties of starch-based foams. 32nd Congress on Science and Technology of Thailand. Chulalongkorn University. October 10-12, 2006. pp. 102-104.

- Kawahara S., Tetsuji K., Takumi S., and Yoshinobu. 2003. Preparation and characterization of natural rubber dispersed in nano-matrix. *Polymer*. 44, 4527–4531.
- Kiatkamjornwong, S., Surunchanajirasakul, P., and Tasakorn, P. 2001. Natural rubber–cassava starch foam by compression moulding. *Plastics Rubber and Composites*. 30, 318-327.
- Kiratitanavit, W. 2001. Synthesis of cassava starch-g-poly(methyl methacrylate) copolymers with benzoyl peroxide as an initiator, Master's degree. Thesis, Chulalongkorn University.
- Kolybaba, M., Tabil, L.G., Panigrahi, S., Crerar, W.J., Powell, T., and Wang, B. 2003. Biodegradable Polymers: Past, Present, and Future. The 2003 CSAE/ASAE Annual Intersectional Meeting Sponsored by the Red River Section of ASAE Quality Inn & Suites 301 3rd Avenue North Fargo, North Dakota, USA. October 3-4, 2003. pp.1-15.
- Lanthong, P., Nuisin, R., and Kiatkamjornwong, S. 2006. Graft copolymerization, characterization, and degradation of cassava starch-g-acrylamide/itaconic acid superabsorbents. *Carbohydrate Polymers*. 66 229–245.
- Lai, C.S., Guetzlaff, J., and Hoseney, R.C. 1989. Role of sodium carbonate and trapped air in extrusion. *Cereal Chemistry*. 66, 69-73.
- Lawton, J.W., Shogren, R.L., and Tiefenbacher, K.F. 1999. Effect of batter solid and starch type on the structure of baked starch foams. *Cereal Chemistry*. 76, 682-687.
- Lawton, J.W., Shogren, R.L., and Tiefenbacher, K.F. 2004. Aspen fiber addition improves the mechanical properties of baked cornstarch foams. *Industrial Crops and Products*. 19, 41-48.
- Leach, H.W. 1965. Gelatinization of starch, In R.L., Whistler, E.F., Paschall, J.N., Bemiller, and H.R., Roberts (eds.), *Starch: Chemical and technology* vol. I, 289-307. New York: Academic press.
- Lehrle, R. S., and Willis, S. L. 1997. Modification of natural rubber: a study to assess the effect of vinyl acetate on the efficiency of grafting methyl methacrylate on rubber in latex form, in the presence of azo-bis-isobutyronitrile. *Polymer*. 38, 5937-5946.
- Lourdin, D., Valle, G. D., and Colonna, P. 1995. Influence of amylose content on starch films and foams. *Carbohydrate Polymers* 27, 261-270.
- Lourdin, D., Valle, G. D., and Colonna, P. 1995. Influence of amylose content on starch films and foams. *Carbohydrate Polymers* 27, 261-270.

- Lourdin, D., Bizot, H., Colonna, P. 1996. Antiplasticization in starch-glycerol film. *J. Applied Polymer Science*. 63, 1047-1053.
- Mano, J.F., Koniarova, D., and Reis, R.L. 2003. Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability, *Journal of materials science: materials in medicine*. 14, 127-135.
- Mayer, J.M., and Elion, G.R. 1994. Cellulose acetate and starch based biodegradable injection molded plastics compositions and methods of manufacture. US. Patent 5,288,318, February 22.
- Mondragón, M., Hernández, E.M., Rivera-Armenta, J.L. and Rodríguez-González, F.J. 2009. Injection molded thermoplastic starch/natural rubber/clay nanocomposites: Morphology and mechanical properties, *Carbohydrate Polymers*. 77, 80-86.
- Minoru H. 2003. Foamed molded object and method for manufacturing the same, JP Patent 2001-204610, January 15.
- Nabar, Y., and Narayan, R. 2006. Twin-screw extrusion production and characterization of starch foam products for use in cushioning and insulation applications, *Polymer Engineering and Science*. 46, 438-451.
- Oliveira, P.C. D., Olivera, A.M.D., Barboza, A.G.J.C.D.S., Zavaglia, C.A.L.D.C., and Santos, A.M.D. 2005. Modification of natural rubber: A study by ^1H NMR to assess the degree of graftization of onto rubber particles under latex form in the presence of a redox couple initiator. *European Polymer Journal*. 41, 1883-1892.
- Paveena K. 2005. Grafting of 2-Hydroxyethyl methacrylate onto natural rubber. *KKU Research Journal* 10, (2), Apr-Jun 2005, 141-150.
- Preechawong, D., Peesan, M., Supaphol, P., and Rujiravanit, R. 2004. Characterization of starch/poly(ϵ -caprolactone) hybrid foams. *Polymer Testing*. 23, 651-657.
- Preechawong, D., Peesan, M., Supaphol, P., and Rujiravanit, R. 2005. Preparation and characterization of starch/poly(L-lactic acid) hybrid foams. *Carbohydrate Polymers*. 59, 329-337.
- Poovarodom, N., Praditdoug, S. 2006. Non-Synthetic biodegradable starch-based composition for production of shaped bodies, US patent 7,067,651, June 27.

- Qudsieh, I.Y.M., Fakhru'l-Razi, A., Muyibi, S.A., Ahmad, M.B., Rahman, M.Z.Ab., Wan-Yunus, W.Md.Z. 2004. Preparation and characterization of poly(methyl methacrylate) grafted sago starch using potassium persulfate as redox initiator. *Journal of Applied Polymer Science*. 94, 1891-1897.
- Ro'z, A.L., Carvalho, D. A.J., Gandini, F. A. and Curvelo, A.A.S. 2006. The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing. *Carbohydrate Polymers*. 63, 417–424.
- Salgado, P.R., Schmidt, V.C., Molina Ortiz, S.E., Mauri, A.N. and Laurindo, J. B. 2008. Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *Journal of Food Engineering*. 85, 435-443.
- Santos, K.A.M., Suarez, P.A.Z., and Rubim, J.C. 2005. Photo-degradation of synthetic and natural polyisoprenes at specific UV radiations, *Polymer Degradation and Stability*. 90, 34-43.
- Sarac, A.S., 1999. Redox polymerization. *Progress in Polymer Science*. 24, 1149–120.
- Shah, A.A., Hasan, F., Hameed, A. and Ahmed, S. 2008. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*. 26, 246-265.
- Senna, M. M., Hossam, F.M., El-Naggar, A.W.M. 2008. Compatibilization of low density polyethylene/plasticized starch blends by reactive compounds and electron beam Irradiation. *Polym. Compos*. DOI 10.1002/pc.20393.
- Shey, J., Imam, S.H., Glenn, G.M., and Orts, W.J. 2006. Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial Crops and Products*. 24, 34-40.
- Shogren, R.L. 1996. Preparation, thermal properties, and extrusion of high-amylose starch acetates. *Carbohydrate Polymer*. 29, 57-62.
- Shogren, R.L., Lawton, J.W., Doane, W.M., and Tiefenbacher, K.F. 1998a. Structure and morphology of baked starch foams. *Polymer*. 39, 6649-6655.
- Shogren, R.L., Lawton, J.W., Doane, W.M., and Tiefenbacher, K.F. 1998b. Starch-poly(vinyl alcohol) foamed articles prepared by baking process. *Journal of Applied polymer Science*. 68, 2129-2140.

- Shogren, R.L., Lawton, J.W., and Tiefenbacher, K.F. 2002. Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties. *Industrial Crops and Products*. 16, 69-79.
- Siracusa, V., Rocculi, P. Romani, S., and Rosa, M.D. 2008. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 19, 634-643.
- Sittipong A. 2004. The grafting of polystyrene onto natural rubber. *KKU Research Journal*. 9 (2), Jun-Dec 2004, 82-95.
- Soykeabkaew, N., Supaphol, P., and Rujiravanit, R. 2004. Preparation and characterization of jute-and flax-reinforced starch-based composite foams. *Carbohydrate Polymers*. 58, 53-63.
- Song, H., Shu-Fen, Z., Xi-Chen, M., Da-Zhi, W., and Jin-Zong Y. 2007. Synthesis and application of starch-graft-poly (AM-co-AMPS) by using a complex initiation system of CS-APS. *Carbohydrate Polymers*. 69, 189-195.
- Tatarka, P.D., and Cunningham, R.L. 1996. Properties of protective loose-fill foams. *Journal of Applied Polymer Science*. 67, 1157-1176.
- Tokiwa, Y., Takagi, S., and Koyama, M. 1993. Starch-containing biodegradable plastic and method of producing same. US. Patent 5,256,711, October 26.
- Thuwall, M., Boldizar, A., and Rigdahl, M. 2006. Extrusion processing of high amylose potato starch materials. *Carbohydrate Polymers*. 63, 441-466.
- Van Soest, J.J.C., De Wit, D., and Vliegenthart, J. F. G. 1996. Mechanical Properties of Thermoplastic Waxy Maize Starch. *Journal of Applied Polymer Science*. 61, 1927-1937.
- Wu, H.C.H., and Sarko, A. 1978. The double-helical molecular structure of crystalline B-amylose. *Carbohydrate Research*. 61, 7-25.
- Zhou, J., and Hanna, M.A. 2004. Extrusion of starch acetate with mixed blowing agent. *Starch/stärke*. 56, 484-494.
- Zhou, J., Song, J., and Parker, R. 2006. Structure and properties of starch-based foams prepared by microwave heating from extruded pellets. *Carbohydrate Polymers*. 63, 466-475.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการมา และผลที่ได้รับ

วัตถุประสงค์*	กิจกรรมที่วางแผนไว้*	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับ
1. เตรียมและศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของโฟมแข็ง โฟมแข็งที่มีน้ำหนักยางธรรมชาติเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น	1.1 ทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมแข็ง และโฟมแข็งผสมน้ำยางธรรมชาติ	1.1 ได้ทำการทดสอบความทนต่อแรงดัดโค้งและความต้านทานต่อแรงกระแทก พร้อมกับวัดความหนาแน่นของโฟมแข็งที่มีและไม่มียางธรรมชาติ โดยมีการศึกษาตัวแปรต่อไปนี้ ปริมาณยางธรรมชาติ ชนิดและปริมาณของสารฟูล ปริมาณของสารลดแรงดึงผิว น้ำยางธรรมชาติ ชนิดและปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยา ระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง ความชื้นสัมพัทธ์ สภาวะการขึ้นรูปโฟม	1.1 บรรยายผลในรายงาน
	1.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมที่เตรียมจาก NR-g-starch จากข้อ 2.1	1.2 ยกเลิกการทดลองเนื่องจากไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จริง	1.2 อธิบายเหตุผลในรายงาน
	1.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิไสไตรีนทางการค้า	1.3 ทดสอบแผ่นโฟมกันกระแทกที่ทำมาจากพอลิไสไตรีน	1.3 รายงานผลในภาคผนวก
	1.4 ทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	1.4 ทำการทดสอบด้วยการฝังดินเป็นเวลา 16 และ 20 สัปดาห์	1.4 บรรยายผลในรายงาน
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา กราฟที่ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและน้ำยางธรรมชาติ	2.1 สังเคราะห์ NR-g-starch โดยใช้แป้ง 3 ชนิด แปรสภาวะการสังเคราะห์ วิเคราะห์ปริมาณการกราฟ	2.1 ทำการสังเคราะห์กราฟที่โคพอลิเมอร์ด้วยแป้งมันสำปะหลัง 3 ชนิด และมีการแปรสภาวะการทดลอง แต่ไม่ได้วิเคราะห์ปริมาณกราฟ เนื่องจากไม่สามารถนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากการสังเคราะห์นี้ไปขึ้นรูปเป็นโฟม	2.1 บรรยายผลในรายงาน

* ตามที่ระบุไว้ในสัญญา

ภาคผนวก ข

สมบัติเชิงกลของโฟมพอลิสไตรีนทางการค้า

สมบัติเชิงกลของโฟมพอลิสไตรีนทางการค้า

สมบัติของโฟมทางการค้า (Expanded polystyrene foam, EPS)

Sample	Density (g/cm ³)	E (MPa)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\epsilon_{\max}$ (%)	Izod impact Strength (J/m ²)
PS foam 1	0.0226 ± 0.0011	11 ± 0.7	0.31 ± 0.01	7.35 ± 0.58	366 ± 36
PS foam 2	0.0366 ± 0.0016	45 ± 3	0.67 ± 0.05	3.90 ± 0.53	470 ± 66
PS foam 3	0.0156 ± 0.0052	6 ± 2	0.19 ± 0.07	7.64 ± 2.48	345 ± 67

PS foam 1= ลังโฟมกันกระแทกนำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบ ขนาด 150 mm x 30 mm x 4 mm

PS foam 2=แผ่นโฟมนำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบ ขนาด 150 mm x 30 mm x 3 mm

PS foam 3=แผ่นโฟมนำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบ ขนาด 150 mm x 30 mm x 5 mm

ภาคผนวก ค

อุณหภูมิจึงความชื้นสัมพัทธ์



ภาคผนวก ค
อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ตารางที่ ค.1

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนมิถุนายน 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Jun-08	-	-	-	-	-	-	-	-
2-Jun-08	47	29.5	46	30.2	50	29.9	48	27.8
3-Jun-08	35	29.3	35	29.5	38	30.4	37	30.6
4-Jun-08	36	29.3	38	30.7	48	31.0	45	29.0
5-Jun-08	39	28.6	50	29.9	48	30.1	46	29.3
6-Jun-08	47	29.4	49	30.1	47	30.1	48	31.1
7-Jun-08	48	29.8	36	30.1	36	31.4	-	-
8-Jun-08	-	-	-	-	-	-	-	-
9-Jun-08	38	29.6	-	-	41	29.1	41	29.2
10-Jun-08	34	28.9	54	29.0	-	-	45	28.3
11-Jun-08	43	28.1	52	29.0	-	-	-	-
12-Jun-08	43	28.8	48	29.1	52	29.8	-	-
13-Jun-08	47	28.1	45	28.8	42	30.3	41	29.5
14-Jun-08	41	28.9	39	30.1	37	30.9	39	29.8
15-Jun-08	-	-	40	29.5	39	30.2	-	-
16-Jun-08	40	29.4	47	30.5	44	31.44	43	31.1
17-Jun-08	-	-	-	-	-	-	34	32.2
18-Jun-08	26	29.6	29.6	31.4	30	31.6	30	29.8
19-Jun-08	35	29.2	38	30.2	30	29.8	-	-
20-Jun-08	41	28.7	46	29.5	53	29.5	40	30.3
21-Jun-08	36	28.9	38	29.9	43	30.9	47	30.1
22-Jun-08	41	28.4	44	29.6	46	30.2	50	29.1
23-Jun-08	-	-	-	-	46	29.1	46	29.0
24-Jun-08	46	28.6	50	29.1	50	28.2	58	27.8
25-Jun-08	44	28.2	42	29.8	48	30.8	47	27.5
26-Jun-08	42	28.8	44	27.6	45	27.9	45	27.5
27-Jun-08	43	27.9	26	29.4	26	29.9	27	28.6
28-Jun-08	32	27.8	-	-	32	29.6	-	-
29-Jun-08	35	28.3	28.8	29.4	43	29.5	-	-
30-Jun-08	30	29.0	20	30.8	28	31.3	34	30.2
Average	40	28.8	41	30	42	30.1	42	29.4
S.D.	7	0.1	15	1	10	0.8	6	0.6

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนมิถุนายน 2551 ภายใต้ 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Jun-08	-	-	-	-	-	-	-	-
2-Jun-08	68	30.1	55	31.2	72	29.8	89	27.8
3-Jun-08	68	29.5	68	29.9	68	31.3	69	30.0
4-Jun-08	75	29.1	60	30.9	70	30.8	83	28.5
5-Jun-08	82	28.5	70	29.8	72	29.4	69	29.4
6-Jun-08	70	29.3	61	30.4	65	30.3	67	30.7
7-Jun-08	77	29.4	72	31.2	64	31.4	71	29.6
8-Jun-08	-	-	-	-	-	-	-	-
9-Jun-08	77	29.3	68	29.7	68	29.5	71	28.9
10-Jun-08	75	28.7	76	28.9	69	28.8	74	27.8
11-Jun-08	76	28.1	70	29.9	70	29.5	73	28.4
12-Jun-08	77	28.1	71	29.0	84	27.9	81	27.4
13-Jun-08	74	27.8	68	28.9	59	30.6	65	29.3
14-Jun-08	78	29.0	68	30.4	57	31.1	72	29.5
15-Jun-08	-	-	76	29.4	70	30.0	-	-
16-Jun-08	79	29.2	57	31.1	54	31.4	58	30.8
17-Jun-08	-	-	-	-	-	-	73	30.8
18-Jun-08	75	29.3	56	31.7	61	31.7	80	29.1
19-Jun-08	75	28.8	71	30.0	78	28.6	-	-
20-Jun-08	82	28.4	82	28.2	73	29.9	67	29.8
21-Jun-08	76	28.6	53	30.6	58	31.0	69	29.5
22-Jun-08	75	28.5	70	29.4	61	30.2	70	29.8
23-Jun-08	-	-	-	-	87	28.4	90	28.6
24-Jun-08	77	28.1	71	29.8	60	27.2	81	27.5
25-Jun-08	79	27.9	88	26.9	61	31.3	-	-
26-Jun-08	76	28.3	78	27.3	81	26.6	81	27.6
27-Jun-08	78	27.8	68	29.2	63	30.1	73	29.6
28-Jun-08	73	27.6	72	29.3	-	-	-	-
29-Jun-08	-	-	83	28.5	75	29.0	-	-
30-Jun-08	80	28.7	61	30.3	61	30.7	73	29.6
Average	76	28.7	69	29.7	68	29.9	74	29.1
S.D.	3	0.0	6	0.4	5	0.6	1	0.3

ตารางที่ ค.3 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนกรกฎาคม 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Jul-08	37	29.0	37	30.0	38	29.6	35	30.0
2-Jul-08	42	30.1	33	30.8	39	30.7	-	-
3-Jul-08	52	27.9	51	27.6	45	28.0	-	-
4-Jul-08	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Jul-08	-	-	-	-	-	-	-	-
6-Jul-08	-	-	42	29.9	45	30.5	45	30.2
7-Jul-08	42	28.8	39	30.1	42	30.9	42	30.8
8-Jul-08	-	-	-	-	-	-	43	29.2
9-Jul-08	44	29.2	43	29.5	43	31.1	40	29.6
10-Jul-08	44	28.9	44	29.9	-	-	43	29.7
11-Jul-08	40	29.0	43	29.5	44	30.2	-	-
12-Jul-08	-	-	-	-	-	-	41	29.4
13-Jul-08	-	-	-	-	-	-	-	-
14-Jul-08	43	29.3	-	-	39	30.1	41	29.9
15-Jul-08	37	29.2	39	29.6	40	30.1	41	30.0
16-Jul-08	35	29.4	38	29.9	43	30.4	41	30.8
17-Jul-08	38	29.6	45	29.6	43	30	-	-
18-Jul-08	-	-	41	29.4	48	30.5	33	30.6
19-Jul-08	-	-	29	29.7	35	30.4	38	29.9
20-Jul-08	-	-	36	29.6	37	28.4	39	28.1
21-Jul-08	35	31.3	20	30.9	25	30.5	18	32.7
22-Jul-08	31	29.3	33	30.6	23	30.7	35	29.3
23-Jul-08	38	28.0	36	29.7	48	28.6	39	28.7
24-Jul-08	39	28.6	41	29.1	-	-	44	27.4
25-Jul-08	44	27.8	43	27.9	-	-	-	-
26-Jul-08	44	28.4	44	28.4	41	29	48	28.9
27-Jul-08	44	28.3	44	28.5	41	31.1	44	29.2
28-Jul-08	41	28.2	41	28.7	42	28.2	37	28.5
29-Jul-08	41	27.9	33	29.2	32	30.3	30	30.0
30-Jul-08	35	28.6	42	30.2	32	31.2	31	30.2
31-Jul-08	31	29.2	32	30.2	33	30.7	33	30.9
Average	40	28.9	39	29.5	39	30.1	38	29.7
S.D.	5	0.8	6	0.8	7	1.0	6	1.1

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนกรกฎาคม 2551 ภายใต้ 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Jul-08	78	30.0	69	30.0	79	29.2	71	29.8
2-Jul-08	78	29.6	76	30.1	66	30.7	-	-
3-Jul-08	94	27.5	84	26.8	74	28.2	-	-
4-Jul-08	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Jul-08	-	-	-	-	-	-	-	-
6-Jul-08	-	-	65	30.1	63	30.9	65	30.6
7-Jul-08	80	28.6	66	30.3	61	30.9	58	30.8
8-Jul-08	-	-	-	-	-	-	82	28.7
9-Jul-08	70	29.1	69	29.8	-	-	69	29.1
10-Jul-08	74	28.7	65	30.3	-	-	71	29.9
11-Jul-08	69	28.5	68	29.2	70	29.5	-	-
12-Jul-08	-	-	-	-	-	-	67	29.1
13-Jul-08	-	-	-	-	76	29.0	-	-
14-Jul-08	71	29.3	64	29	61	30.8	77	29.1
15-Jul-08	76	28.4	62	29.9	61	30.3	59	30.9
16-Jul-08	78	28.8	68	29.4	59	30.1	59	30.8
17-Jul-08	70	29.3	70	29.6	59	29.8	-	-
18-Jul-08	-	-	67	29.9	55	30.7	60	29.7
19-Jul-08	-	-	63	29.4	85	27.5	62	29.9
20-Jul-08	-	-	54	30.6	57	30.6	82	27.8
21-Jul-08	71	28.2	71	28.5	69	28.8	57	30.6
22-Jul-08	71	29.3	66	30.2	73	29	82	29.1
23-Jul-08	79	27.9	73	29.2	-	-	73	29.2
24-Jul-08	79	28.3	-	-	-	-	91	26.8
25-Jul-08	80	27.5	-	-	74	28.6	-	-
26-Jul-08	76	28.1	76	28.1	59	29.2	74	28.4
27-Jul-08	-	-	71	29.0	77	28.2	65	28.7
28-Jul-08	75	28.0	74	28.5	53	30.0	93	27.9
29-Jul-08	82	27.6	61	29.4	55	30.2	61	29.2
30-Jul-08	73	28.5	61	30.6	70	30.8	64	30.0
31-Jul-08	72	29.0	63	30.2	61	30.5	62	30.9
Average	76	28.6	68	29.5	66	29.7	70	29.4
S.D.	6	0.7	6	0.9	9	1.0	11	1.1

ตารางที่ ค.5 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนสิงหาคม 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
02-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
03-Aug-09	-	-	41	29.5	38	29.8	40	29.2
04-Aug-09	40	28.3	39	29.8	38	30.3	-	-
05-Aug-09	39	29.4	39	30.0	39	29.7	42	29.5
06-Aug-09	41	28.8	-	-	40	28.7	41	28.7
07-Aug-09	41	28.5	43	28.8	42	28.6	41	28.6
08-Aug-09	42	28.4	42	28.5	44	29.2	41	29.1
09-Aug-09	-	-	45	28.7	42	30.5	41	30.1
10-Aug-09	-	-	43	29.6	-	-	33	32.1
11-Aug-09	37	30.4	35	30.4	27	31.3	-	-
12-Aug-09	-	-	34	30.2	32	30.3	-	-
13-Aug-09	-	-	28	30.0	-	-	-	-
14-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
15-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
16-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
17-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
18-Aug-09	35	29.0	30	30.0	32	29.5	36	29.7
19-Aug-09	30	28.8	28	30.8	32	29.6	34	28.6
20-Aug-09	31	28.7	30	30.2	31	30.4	35	29.2
21-Aug-09	40	28.7	44	29.2	39	29.3	38	29.3
22-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
23-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
24-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
25-Aug-09	37	28.8	42	29.4	41	29.7	42	28.9
26-Aug-09	42	28.5	43	29.9	42	30.2	43	29.3
27-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
28-Aug-09	44	28.4	41	28.6	42	28.7	35	28.4
29-Aug-09	38	28.5	36	29.0	41	28.9	54	28.3
30-Aug-09	41	28.1	41	29.6	40	30.8	44	29.2
31-Aug-09	38	29.2	37	30.8	38	29.8	38	29.6
Average	39	28.8	38	29.7	38	29.8	40	29.3
S.D.	0	0.3	1	0.8	0	0.0	1	0.2

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนสิงหาคม 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
02-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
03-Aug-09	-	-	72	29.4	72	27.9	73	29.0
04-Aug-09	78	28.0	65	30.1	65	30.6	68	29.2
05-Aug-09	73	29.0	63	30.0	63	29.3	78	29.1
06-Aug-09	79	28.5	68	-	-	28.6	77	28.7
07-Aug-09	77	28.2	76	28.7	76	28.7	76	28.9
08-Aug-09	78	28.1	67	28.5	67	29.1	71	28.6
09-Aug-09	-	-	69	29.0	69	30.9	60	30.2
10-Aug-09	-	-	72	29.5	72	30.8	56	31.6
11-Aug-09	79	29.4	56	30.6	56	31.3	-	-
12-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
13-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
14-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
15-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
16-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
17-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
18-Aug-09	80	28.6	63	30.3	63	29.2	78	29.4
19-Aug-09	75	28.5	61	31.0	61	30.1	70	28.9
20-Aug-09	81	28.6	64	30.6	64	30.1	78	28.7
21-Aug-09	77	28.5	69	29.4	69	29.4	73	29.2
22-Aug-09	77	28.6	-	-	-	-	-	-
23-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
24-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
25-Aug-09	77	28.7	72	29.2	72	29.7	70	29.8
26-Aug-09	75	28.4	62	30.1	62	30.3	76	29.0
27-Aug-09	-	-	-	-	-	-	-	-
28-Aug-09	76	28.5	62	28.9	62	29.8	76	29.1
29-Aug-09	81	28.4	59	28.8	59	29.2	83	28.0
30-Aug-09	83	27.9	68	29.9	68	31.4	71	29.0
31-Aug-09	69	29.5	58	31.3	58	29.7	70	29.4
Average	77	28.6	65	29.7	66	29.8	72	29.2
S.D.	6	0.7	5	1.1	5	0.1	2	0.1

ตารางที่ ค.7 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนกันยายน 2551 ภายใต้ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Sep-08	38	29.0	38	30	-	-	37	30.3
02-Sep-08	39	29.1	-	-	37	30.2	38	29.8
03-Sep-08	38	29.0	38	30.1	38	30.5	37	30.9
04-Sep-08	39	29.4	38	30.0	38	30.3	41	30.2
05-Sep-08	34	29.2	44	29.6	41	29.0	45	29.0
06-Sep-08	43	28.6	41	29.4	42	29.2	43	28.7
07-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
08-Sep-08	41	28.2	41	28.5	40	28.6	41	29.5
09-Sep-08	41	27.8	42	28.2	33	29.3	-	-
10-Sep-08	-	-	-	-	33	29.1	-	-
11-Sep-08	-	-	-	-	34	28.5	40	27.4
12-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
13-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
14-Sep-08	-	-	-	-	36	28.9	37	30.0
15-Sep-08	-	-	-	-	37	30.9	37	30.8
16-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
17-Sep-08	-	-	40	29.2	40	30.5	-	-
18-Sep-08	-	-	40	29.8	40	30.2	-	-
19-Sep-08	40	29.4	33	30.4	-	-	-	-
20-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
21-Sep-08	36	28.4	42	29.4	37	30.8	-	-
22-Sep-08	33	29.5	-	-	-	-	-	-
23-Sep-08	40	29.6	-	-	-	-	-	-
24-Sep-08	41	29.7	36	30.4	-	-	-	-
25-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
27-Sep-08	35	29.2	-	-	-	-	-	-
28-Sep-08	36	29.4	39	30.0	33	30.2	39	30.1
29-Sep-08	33	29.2	34	29.3	35	29.3	36	29.2
30-Sep-08	36	28.4	39	29.0	39	28.8	40	28.7
Average	38	29.0	39	29.5	37	29.7	40	29.5
S.D.	1	0.4	0	0.4	1	0.6	0	0.6

ตารางที่ ค.8

อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนกันยายน 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Sep-08	78	28.8	60	30.5	-	-	68	30.0
2-Sep-08	76	28.8	-	-	64	30.2	67	29.8
3-Sep-08	76	28.9	59	30.1	61	30.6	63	30.7
4-Sep-08	74	29.1	60	30.2	63	30.4	71	29.7
5-Sep-08	79	28.9	72	29.5	67	29.9	70	28.8
6-Sep-08	75	28.5	67	29.8	64	29.1	72	28.8
7-Sep-08	70	27.9	-	-	-	-	-	-
8-Sep-08	70	27.9	66	28.6	67	28.4	80	27.4
9-Sep-08	75	27.6	72	28.4	-	-	64	29.1
10-Sep-08	-	-	-	-	60	29.8	-	-
11-Sep-08	-	-	-	-	82	28.3	83	27.0
12-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
13-Sep-08	-	-	-	-	82	28.3	83	27.0
14-Sep-08	-	-	-	-	66	29.0	62	30.0
15-Sep-08	-	-	-	-	46	31.3	53	31.0
16-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
17-Sep-08	-	-	73	29.0	61	30.4	-	-
18-Sep-08	-	-	69	29.8	62	30.2	-	-
19-Sep-08	73	29.6	65	30.5	-	-	-	-
20-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
21-Sep-08	73	28.2	61	29.9	-	-	-	-
22-Sep-08	-	-	-	-	54	31.2	-	-
23-Sep-08	68	29.7	61	30.6			72	29.8
24-Sep-08	70	29.6	61	30.5				
25-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Sep-08	-	-	-	-	-	-	-	-
27-Sep-08	71	29.2	-	-	-	-	-	-
28-Sep-08	72	29.2	62	30.2	68	30.4	70	30.0
29-Sep-08	71	29.0	70	28.8	72	28.8	75	28.9
30-Sep-08	75	28.2	70	28.5	71	28.5	75	28.4
Average	73.1	28.8	65.9	29.6	65.3	29.7	70.7	29.1
S.D.	1.3	0.4	2.9	0.8	4.0	0.8	3.1	0.5

ตารางที่ ค.9 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนตุลาคม 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Oct-08	32	28.6	35	29.9	35	30.1	68	30.1
2-Oct-08	33	28.5	35	28.8	-	-	-	-
3-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
4-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
6-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
7-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
8-Oct-08	44	30.2	38	30.7	37	30.0	39	28.9
9-Oct-08	33	29.7	32	29.2	33	29.1	43	29.6
10-Oct-08	41	28.6	38	28.9	33	28.9	39	29.4
11-Oct-08	-	-	41	29.6	44	30.2	-	-
12-Oct-08	39	28.4	42	29.9	44	30.3	-	-
13-Oct-08	39	28.5	41	29.9	39	29.6	45	28.9
14-Oct-08	42	28.3	43	29.0	40	30.0	-	-
15-Oct-08	31	28.9	31	29.6	32	30.5	-	-
16-Oct-08	31	28.7	35	30.3	35	29.7	36	29.8
17-Oct-08	34	28.8	-	-	-	-	-	-
18-Oct-08	34	29.0	38	29.3	36	29.8	40	30.0
19-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
20-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
21-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
22-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
23-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
24-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
25-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
27-Oct-08	-	-	-	-	38	29.7	41	28.3
28-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
29-Oct-08	39	28.0	30	29.2	30	29.9	29	29.6
30-Oct-08	26	28.2	27	29.1	28	28.9	40	29.3
31-Oct-08	35	28.3	37	29.9	30	30.2	39	28.7
Average	36	28.7	36	29.6	36	29.8	39	29.3
S.D.	1	0.3	0	0.2	4	0.3	0	0.4

ตารางที่ ค.10 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนตุลาคม 2551 ภายใต 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
1-Oct-08	75	28.5	76	28.9	70	29	78	29.7
2-Oct-08	68	28.2	70	29.1	-	-	-	-
3-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
4-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
5-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
6-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
7-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
8-Oct-08	75	28.2	61	30.3	59	30.8	69	29.5
9-Oct-08	78	28.7	78	28.8	74	29	77	29.2
10-Oct-08	82	28.5	82	28.6	78	28.8	74	29.1
11-Oct-08	-	-	69	30.3	71	30.1	-	-
12-Oct-08	-	-	68	29.4	67	29.2	-	-
13-Oct-08	78	28.5	61	30.0	70	29.4	81	28.7
14-Oct-08	83	28.2	75	29.7	67	30.1	-	-
15-Oct-08	80	28.6	66	30.7	66	30.5	-	-
16-Oct-08	81	28.4	82	29.2	72	29.9	69	29.8
17-Oct-08	81	28.6	-	-	-	-	-	-
18-Oct-08	81	28.8	78	29.3	-	-	-	-
19-Oct-08	-	-	-	-	70	30.1	73	30.1
20-Oct-08	-	-	-	-	-	-	72	29.7
21-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
22-Oct-08	84	28.0			-	-	-	-
23-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
24-Oct-08	79	28.2	76	29.2	-	-	-	-
25-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Oct-08	-	-	-	-	-	-	-	-
27-Oct-08	80	28.8	75	29.1	75	30.0	72	30.0
28-Oct-08	-	-	68	29.2	62	29.8	70	28.6
29-Oct-08	80	27.9	66	29.2	56	30.2	59	29.7
30-Oct-08	76	28.1	75	28.9	75	28.6	71	28.9
31-Oct-08	78	28.1	64	30.0	64	30.1	69	28.9
Average	80	28.4	72	29.5	68	29.8	71	29.4
S.D.	1	0.2	5	0.4	3	0.2	2	0.3

ตารางที่ ค.11 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนพฤศจิกายน 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Nov-08	33	28.9	35	29.7	44	29.1	34	29.0
02-Nov-08	38	28.2	42	28.8	41	29	45	29.0
03-Nov-08	-	-	-	-	37	29.2	-	-
04-Nov-08	39	28.2	38	29.3	44	30.2	37	29.2
05-Nov-08	38	28.7	43	29.8	41	30	-	-
06-Nov-08	41	28.4	44	29.6	43	27.1	40	29.8
07-Nov-08	42	28.3	44	27.3	35	27.6	-	-
08-Nov-08	-	-	34	27.6	45	28.4	41	27.8
09-Nov-08	-	-	33	27.7	38	28.6	-	-
10-Nov-08	35	27.7	37	28.4	39	27.5	45	28.5
11-Nov-08	45	27.4	41	27.6	43	28.3	45	27.8
12-Nov-08	44	27.4	42	27.6	-	-	-	-
13-Nov-08	42	27.3	-	-	-	-	42	28.1
14-Nov-08	41	27.5	41	27.4	43	28.4		
15-Nov-08	39	27.9	41	28	-	-	43	28.4
16-Nov-08	33	27.6	-	-	-	-	-	-
17-Nov-08	27	29.1	29	28.3	38	30.0	34	28.8
18-Nov-08	37	28.4	38	29.6	38	26.7	40	29.6
19-Nov-08	37	27.6	41	28.4	43	27.9	-	-
20-Nov-08	39	27.4	40	27.8	37	27.9	-	-
21-Nov-08	39	27.3	39	27.9	39	-	40	28.1
22-Nov-08	41	27.3	-	-	-	-	-	-
23-Nov-08	36	26.9	-	-	38	27.3	36	27.7
24-Nov-08	-	-	40	26.3	45	26.3	-	-
25-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
27-Nov-08	-	-	-	-	39	27.6	-	-
28-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
29-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
30-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	38	27.9	39	28.3	41	28.3	40	28.6
S.D.	4	0.6	4	1.0	3	1.1	4	0.7

ตารางที่ ค.12 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนพฤศจิกายน 2551 ภายใต้ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Nov-08	75	28.5	59	29	78	28.5	78	28.8
02-Nov-08	80	28.0	-	-	-	-	-	-
03-Nov-08	-	-	61	29.3	59	29.7	70	29.2
04-Nov-08	79	28.0	62	29.6	58	31.5	56	30.1
05-Nov-08	76	28.4	64	30.1	64	30.3	-	-
06-Nov-08	77	28.3	63	30.3	69	30.4	68	30.3
07-Nov-08	78	28.5	82	27.6	81	27.7	-	-
08-Nov-08	-	-	90	27.3	87	27.5	86	27.5
09-Nov-08	-	-	94	27.5	87	28.3	-	-
10-Nov-08	92	27.3	90	28.5	93	28.2	89	27.6
11-Nov-08	91	27.2	89	27.5	96	27.3	87	27.3
12-Nov-08	90	27.1	92	27.7	75	28.4	82	28.6
13-Nov-08	88	27.1	-	-	-	-	82	27.9
14-Nov-08	86	27.1	76	27.6	-	-	72	28.3
15-Nov-08	91	27.5	89	27.7	83	27.98	72	28.6
16-Nov-08	86	27.3	-	-	-	-	-	-
17-Nov-08	80	28.5	81	28.4	64	28.5	71	28.9
18-Nov-08	87	27.9	72	29.6	98	30.0	-	-
19-Nov-08	85	28.0	89	27.2	87	27.3	-	-
20-Nov-08	87	27.4	84	27.5	98	26.1	-	-
21-Nov-08	89	27.0	81	27.8	87	27.3	-	-
22-Nov-08	90	26.7	93	26.9	82	27.8	91	27.3
23-Nov-08	-	-	99	27.0	89	27.3	93	27.5
24-Nov-08	99	25.9	99	25.6	96	27	-	-
25-Nov-08	-	-	-	-	99	26	-	-
26-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
27-Nov-08	-	-	-	-	93	27.4	-	-
28-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
29-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
30-Nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	85	27.6	81	28.1	83	28.2	78	28.4
S.D.	6	0.7	13	1.2	13	1.4	11	1.0

ตารางที่ ค.13 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนธันวาคม 2551 ภายใต้อุณหภูมิ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Dec-08	-	-	40	26.1	39	26.1	-	-
02-Dec-08	30	26.6	40	27.1	40	27.6	39	27.0
03-Dec-08	40	27.1	43	27.7	47	28.7	41	27.7
04-Dec-08	46	26.6	51	28.0	-	-	27	27.1
05-Dec-08	41	27.1	38	28.2	-	-	-	-
06-Dec-08	40	27.3	43	27.5	-	-	-	-
07-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
08-Dec-08	-	-	-	-	47	26.6	47	27.2
09-Dec-08	38	26.8	27	27.7	41	27.6	-	-
10-Dec-08	-	-	43	27.7	41	28.4	43	28.0
11-Dec-08	45	27.3	41	28.5	41	28.0	41	28.0
12-Dec-08	41	27.8	37	28.7	31	29.3	39	28.8
13-Dec-08	-	-	41	28.9	45	29.5	-	-
14-Dec-08	40	27.3	-	-	-	-	-	-
15-Dec-08	47	27.3	44	27.8	42	27.8	44	27.3
16-Dec-08	-	-	42	28.3	45	28.3	37	27.9
17-Dec-08	45	27.4	23	28.2	23	27.9	30	27.8
18-Dec-08	34	28.0	34	28.6	32	28.2	34	28.2
19-Dec-08	33	26.3	35	27.8	34	28.4	32	27.9
20-Dec-08	31	26.9	37	27.8	-	-	-	-
21-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
22-Dec-08	31	28.6	34	27.7	34	28.6	39	27.5
23-Dec-08	36	28.7	35	27.3	35	27.9	39	27.2
24-Dec-08	41	26.4	43	27.6	42	27.7	42	27.1
25-Dec-08	43	26.0	48	28.3	55	26.6	42	26.9
26-Dec-08	48	25.8	39	26.3	38	26.2	36	26.6
27-Dec-08	39	26.5	41	28.5			36	25.5
28-Dec-08	40	26.6	39	27.9	38	28.1	38	26.9
29-Dec-08	-	-	-		-	-	-	-
30-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
31-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	39	27.1	39	27.9	40	28.0	38	27.4
S.D.	5	0.8	6	0.6	7	0.9	5	0.7

ตารางที่ ค.14 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนธันวาคม 2551 ภายใต้ 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Dec-08	-	-	98	26.1	93	26.1	-	-
02-Dec-08	91	26.1	87	26.8	89	27.9	80	26.6
03-Dec-08	99	26.7	81	28.0	85	28.8	83	27.3
04-Dec-08	99	26.4	82	28.0	72		77	28.2
05-Dec-08	92	26.6	79	28.2	-	-	79	27.3
06-Dec-08	89	27.0	85	27.5	-	-	-	-
07-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
08-Dec-08	95	26.9	87	26.3	86	26.3	76	27.2
09-Dec-08	85	26.5	-	-	73	27.8	-	-
10-Dec-08	-	-	77	27.6	68	28.3	72	27.7
11-Dec-08	83	27.6	74	27.8	70	27.8	70	28.0
12-Dec-08	76	27.9	65	28.2	52	28.9	60	28.9
13-Dec-08	-	-	71	28.4	75	28.0	-	-
14-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
15-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
16-Dec-08	-	-	65	28.4	65	28.3	73	27.7
17-Dec-08	75	27.1	69	28.1	73	27.7	72	27.5
18-Dec-08	75	27.3	62	28.1	71	27.6	67	27.6
19-Dec-08	82	26.2	65	27.9	66	28.3	79	27.1
20-Dec-08	81	26.8	69	27.6	67	27.9	68	28.3
21-Dec-08	82	26.7	-	-	66	27.8	-	-
22-Dec-08	84	26.7	68	28.0	67	28.6	75	27.1
23-Dec-08	93	26.6	70	28.0	72	28.7	86	26.8
24-Dec-08	92	26.4	82	27.1	75	27.2	88	25.1
25-Dec-08	99	25.3	88	26.3	86	26	99	25.2
26-Dec-08	99	25.6	99	25.6	99	25.7	99	25.5
27-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
28-Dec-08	-	-	-	-	-	-	-	-
29-Dec-08	95	25.5			-	-	-	-
30-Dec-08	-	-		-	-	-	-	-
31-Dec-08	-	-		-	-	-	-	-
Average	88	26.6	76	27.6	74	27.8	78	27.2
S.D.	8	0.7	11	0.8	11	1.0	10	1.0

ตารางที่ ค.15 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนมกราคม 2552 ภายใต้ 40%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
02-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
03-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
04-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
05-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
06-Jan-09	40	26.6	41	27.7	49	28.6	39	27.4
07-Jan-09	42	26.4	44	28.1	39	28.1	39	27.2
08-Jan-09	36	26.6	40	27.9	-	-	42	27.2
09-Jan-09	42	26.3	38	27.9	40	27.5	39	26.9
10-Jan-09	36	26.4	40	27.5	36	28.0	36	26.5
11-Jan-09	-	-	39	26.7	40	27.5	39	27.2
12-Jan-09	41	25.1	41	26.5	38	27.3	40	27.0
13-Jan-09	-	-	45	26.1	49	26.1	47	27.5
14-Jan-09	-	-	41	26.1	45	27.0	46	26.5
15-Jan-09	38	28.9	46	26.1	40	29.4	42	25.8
16-Jan-09	41	25.8	45	26.6	46	27.0	41	26.9
17-Jan-09	40	26.0	43	26.5	41	26.5	-	-
18-Jan-09	-	-	43	27.0	42	26.8	-	-
19-Jan-09	40	25.7	37	26.8	-	-	39	27.0
20-Jan-09	40	26.0	-	-	-	-	46	27.3
21-Jan-09	43	25.7	-	-	-	-	45	27.3
22-Jan-09	30	26.2	-	-	28	22.2	31	27.6
23-Jan-09	33	26.1	29	28.1	-	-	30	27.9
24-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
25-Jan-09	36	26.7	-	-	-	-	-	-
26-Jan-09	34	26.4	-	-	-	-	-	-
27-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
28-Jan-09	-	-	-	-	-	28.4	39	27.1
29-Jan-09	38	26.2	33	28.3	36	28.0	40	27.0
30-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
31-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	38	26.3	40	27.1	41	27.2	40	27.1
S.D.	4	0.8	5	0.8	6	1.6	5	0.5

ตารางที่ ค.16 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละวันประจำเดือนมกราคม 2552 ภายใต 70%RH

Date	9 a.m.		12 p.m.		3 p.m.		6 p.m.	
	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)	RH (%)	Temp. (°C)
01-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
02-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
03-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
04-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
05-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
06-Jan-09	85	26.7	65	28.1	66	28.5	85	26.7
07-Jan-09	94	26.1	63	28.5	65	28.9	75	27.3
08-Jan-09	86	26.7	71	27.9	-	-	93	26.3
09-Jan-09	83	26.3	66	27.7	71	27.0	66	26.4
10-Jan-09	70	26.3	63	27.6	59	27.3	62	25.9
11-Jan-09	-	-	58	27.0	56	27.4	62	26.7
12-Jan-09	81	25.0	65	26.5	61	27.1	75	26.4
13-Jan-09	-	-	96	25.5	89	25.1	81	25.2
14-Jan-09	-	-	70	26.1	61	26.5	60	25.9
15-Jan-09	79	25.8	92	24.9	74	25.9	-	-
16-Jan-09	68	25.6	61	26.9	62	26.5	74	25.8
17-Jan-09	76	26.0	72	26.7	82	26.0	-	-
18-Jan-09	75	25.5	-	-	-	-	-	-
19-Jan-09	76	25.5	63	27.2	-	-	76	26.3
20-Jan-09	78	26.1	-	-	-	-	71	26.6
21-Jan-09	-	-	-	-	-	-	75	26.7
22-Jan-09	87	25.8	65	28.5	60	28.1	73	26.8
23-Jan-09	84	26.1	68	-	-	-	76	27.3
24-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
25-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
26-Jan-09	77	26.6	55	28.8	62	-	-	-
27-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
28-Jan-09	-	-	-	-	68	28.2	-	-
29-Jan-09	83	26.3	-	-	-	-	81	26.0
30-Jan-09	-	-	-	-	-	-	68	27.0
31-Jan-09	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	80	26.0	68	27.2	67	27.1	74	26.4
S.D.	7	0.5	11	1.1	9	1.1	9	0.6



ตารางที่ ค.17 ค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละเดือนในช่วงเวลาต่างๆ ภายใต้ 40%RH

Month	9 a.m.	12 p.m.	3 p.m.	6 p.m.
June-08	40 ± 7	41 ± 15	42 ± 10	42 ± 6
July-08	40 ± 5	39 ± 6	39 ± 7	38 ± 6
August-08	39 ± 0	38 ± 1	38 ± 0	40 ± 1
September-08	38 ± 1	39 ± 0	37 ± 1	40 ± 0
October-08	36 ± 1	36 ± 0	36 ± 4	39 ± 0
November-08	38 ± 4	39 ± 4	41 ± 3	40 ± 4
December-08	39 ± 5	39 ± 6	40 ± 7	38 ± 5
January-08	38 ± 4	40 ± 5	41 ± 6	40 ± 5
Average	38 ± 1	39 ± 1	39 ± 2	40 ± 1

ตารางที่ ค.18 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของแต่ละเดือนในช่วงเวลาต่างๆ ภายใต้ 40%RH

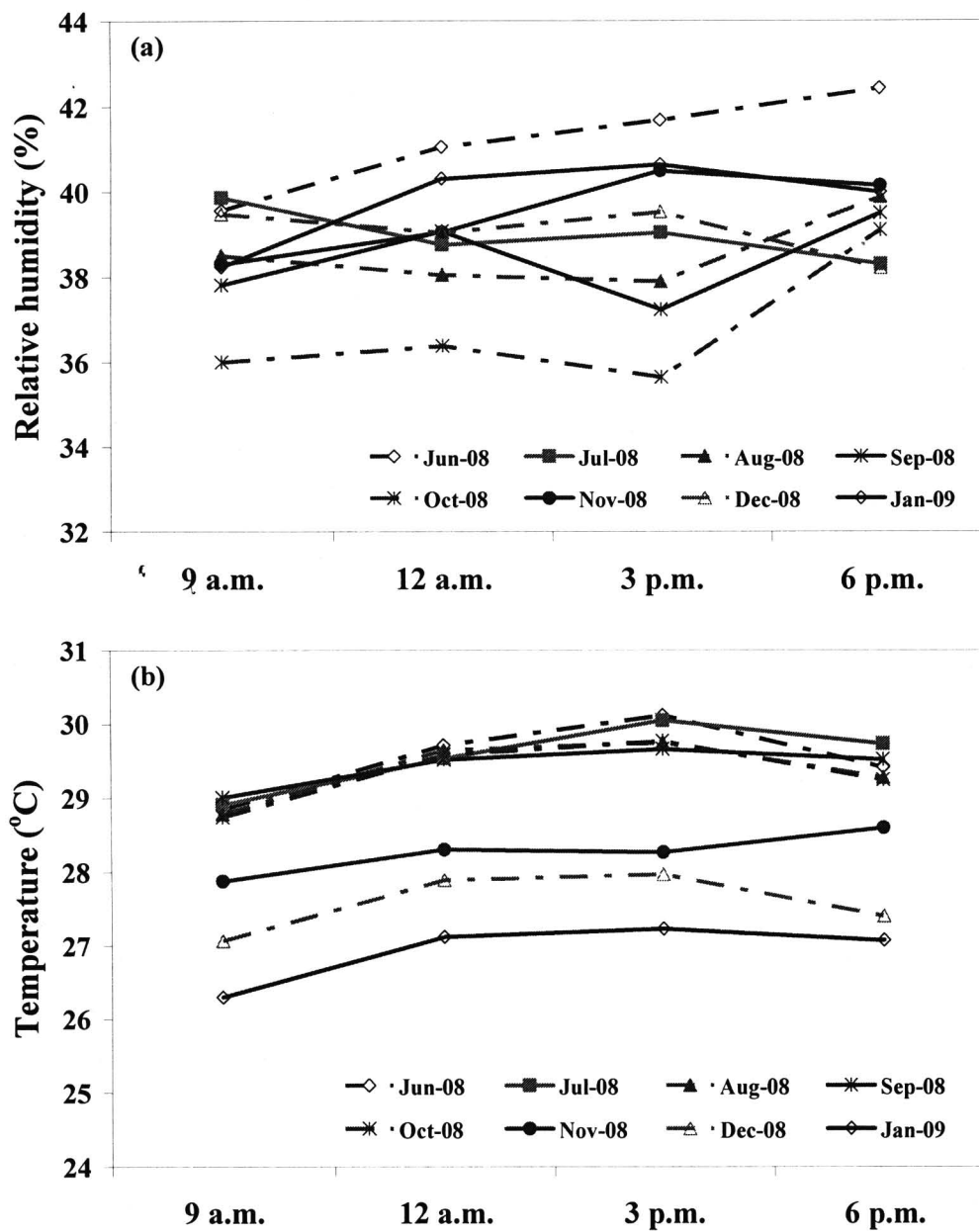
Month	9 a.m.	12 p.m.	3 p.m.	6 p.m.
June-08	28.8±0.1	30.0 ± 1.0	30.1 ± 0.8	29.4 ± 0.6
July-08	28.9 ± 0.8	29.5 ± 0.8	30.1 ± 1.0	29.7 ± 1.1
August-08	28.8 ± 0.3	29.7 ± 0.8	29.8 ± 0.0	29.3 ± 0.2
September-08	29.0 ± 0.4	29.5 ± 0.4	29.7 ± 0.6	29.5 ± 0.6
October-08	28.7 ± 0.3	29.6 ± 0.2	29.8 ± 0.3	29.3 ± 0.4
November-08	27.9 ± 0.6	28.3 ± 1.0	28.3 ± 1.1	28.6 ± 0.7
December-08	27.1 ± 0.8	27.9 ± 0.6	28.0 ± 0.9	27.4 ± 0.7
January-08	26.3 ± 0.8	27.1 ± 0.8	27.2 ± 1.6	27.1 ± 0.5
Average	28.2 ± 1.0	28.9 ± 1.0	29.1 ± 1.0	28.8 ± 1.0

ตารางที่ ค.19 ค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ของแต่ละเดือนในช่วงเวลาต่างๆ ภายใต้ 70%RH

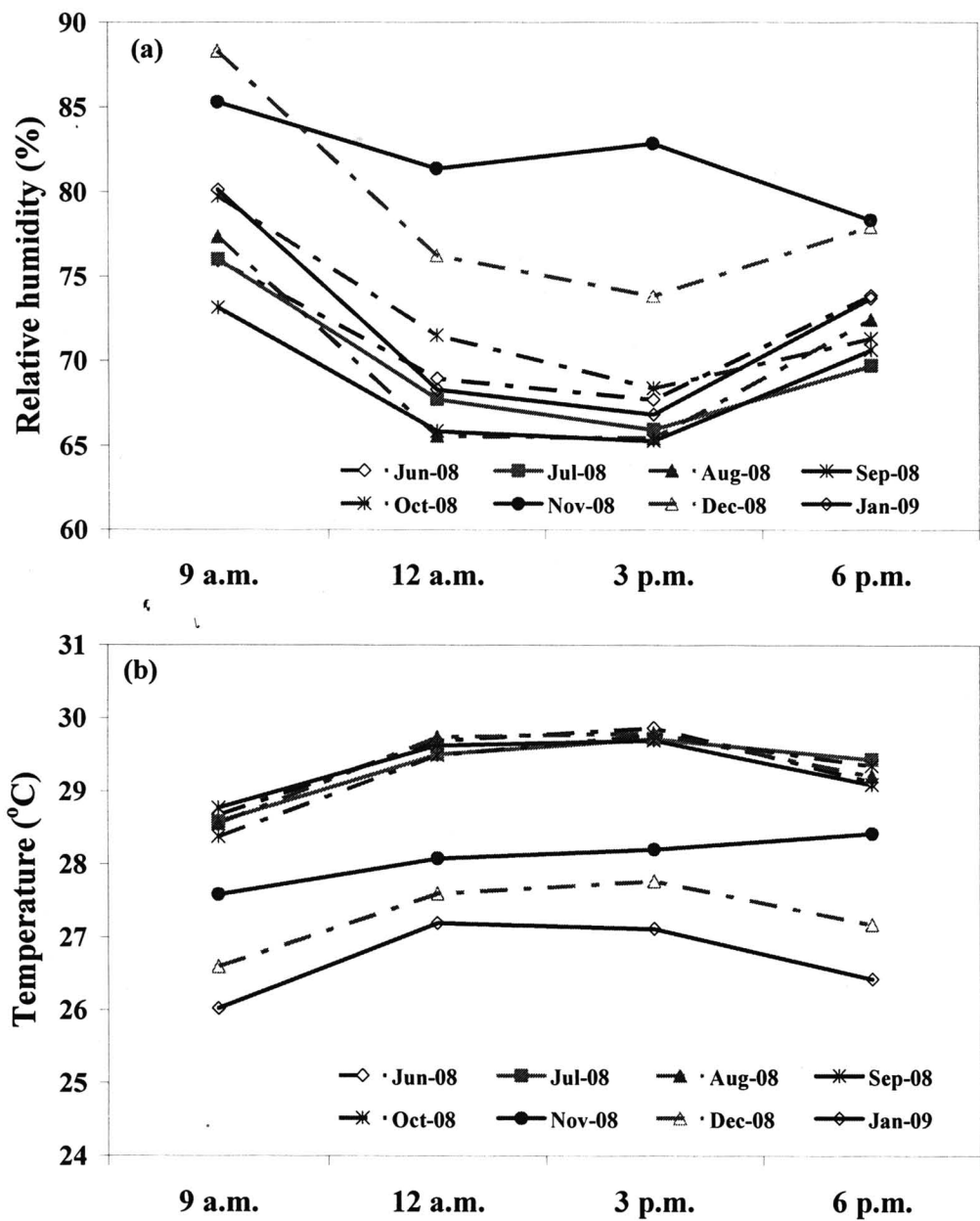
Month	9 a.m.	12 p.m.	3 p.m.	6 p.m.
June-08	76 ± 3	69 ± 6	68 ± 5	74 ± 1
July-08	76 ± 6	68 ± 6	66 ± 9	70 ± 11
August-08	77 ± 6	65 ± 5	66 ± 5	72 ± 2
September-08	73 ± 1	66 ± 3	65 ± 4	71 ± 3
October-08	80 ± 1	72 ± 5	68 ± 3	71 ± 2
November-08	85 ± 6	81 ± 13	83 ± 13	78 ± 11
December-08	88 ± 8	76 ± 11	74 ± 11	78 ± 10
January-08	80 ± 7	68 ± 11	67 ± 9	74 ± 9
Average	79 ± 5	71 ± 6	70 ± 6	74 ± 3

ตารางที่ ค.20 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของแต่ละเดือนในช่วงเวลาต่างๆ ภายใต้ 40%RH

Month	9 a.m.	12 p.m.	3 p.m.	6 p.m.
June-08	28.7 ± 0.0	29.7 ± 0.4	29.9 ± 0.6	29.1 ± 0.3
July-08	28.6 ± 0.7	29.5 ± 0.9	29.7 ± 1.0	29.4 ± 1.1
August-08	28.6 ± 0.7	29.7 ± 1.1	29.8 ± 0.1	29.2 ± 0.1
September-08	28.8 ± 0.4	29.6 ± 0.8	29.7 ± 0.8	29.1 ± 0.5
October-08	28.4 ± 0.2	29.5 ± 0.4	29.8 ± 0.2	29.4 ± 0.3
November-08	27.6 ± 0.7	28.1 ± 1.2	28.2 ± 1.4	28.4 ± 1.0
December-08	26.6 ± 0.7	27.6 ± 0.8	27.8 ± 1.0	27.2 ± 1.0
January-08	26.0 ± 0.5	27.2 ± 1.1	27.1 ± 1.1	26.4 ± 0.6
Average	27.9 ± 1.1	28.9 ± 1.1	29.0 ± 1.1	28.5 ± 1.1



รูปที่ ก.1 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของ (a) ความชื้นสัมพัทธ์ และ (b) อุณหภูมิตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2551-มกราคม 2552 ภายใต้ 40%RH



รูปที่ ค.2 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของ (a) ความชื้นสัมพัทธ์ และ (b) อุณหภูมิตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2551-มกราคม 2552 ภายใต้ 70%RH

ภาคผนวก ง

Manuscript

Effect of Potassium Persulfate on Graft Copolymerization and Mechanical Properties of Cassava Starch/Natural Rubber Foams

Varaporn Tanrattanakul, Wannapa Chumeka

Faculty of Science, Bioplastic Research Unit, Polymer Science Program, Prince of Songkla University, Hadayai, Songkla 90112, Thailand

Received 26 August 2009; accepted 1 October 2009

DOI 10.1002/app.31514

Published online 00 Month 2009 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).

ABSTRACT: The aim of this study was to improve the mechanical properties of thermoplastic starch foams prepared from cassava starch blended with natural rubber latex by reactive blending. Potassium persulfate was used as an initiator for graft copolymerization between the starch and natural rubber during baking. The starch-natural rubber graft copolymer (starch-g-NR copolymer) was successfully produced during both suspension and melt blending based on $^1\text{H-NMR}$ and FTIR characterization. Natural rubber increased the flexural modulus of starch/natural rubber foams without potassium persulfate, thus indicating the compatibility of the blends. The starch-g-NR copolymer, acting as a compatibilizing agent, enhanced the impact strength of foams, but it did not improve the flexural modulus. This may be due to the potassium persulfate decreasing the molecular weight of the natural rubber.

Relative humidity also played an important role on the mechanical properties. Foams became more ductile at higher relative humidities. Since foam density increased with an increasing natural rubber content, the specific impact strength was also considered. A soil burial test showed that the cassava starch foams and foams containing 15 pph of natural rubber were fully biodegraded within 8 and 18 weeks, respectively. The starch-g-NR copolymer delayed biodegradation of foams and foams containing high natural rubber content, i.e., 35 pph, showed a low ability to be biodegraded. © 2009 Wiley Periodicals, Inc. *J Appl Polym Sci* 000: 000–000, 2009

Key words: thermoplastic starch foams; cassava starch; natural rubber latex; biodegradable polymer; renewable resources

INTRODUCTION

Currently, there is a great deal of interest in biodegradable polymers because of environmental concerns, especially polymers derived from renewable resources. As a result, thermoplastic starch has been widely studied in recent years. Thermoplastic starch foams have been prepared from many kinds of starch such as maize starch,^{1,2} potato starch,^{1,3–6} cassava starch,^{2,3,7} rice starch,⁷ wheat starch,^{2–5,8,9} and corn starch.^{2–5,10–12} Because of the brittleness and hygroscopic characteristics of thermoplastic starch, starch has been blended with other polymers prior to foam processing. Both biodegradable and nonbiodegradable polymers have been blended with starch

to make thermoplastic starch foams. These include polymers such as polystyrene,^{13,14} poly(methyl methacrylate),¹⁴ low-density polyethylene,¹⁵ polyurethane,¹⁶ polystyrene blended with poly(ethylene-co-vinyl alcohol),¹⁷ biodegradable copolyester,^{18,19} poly(lactic acid),^{20–26} poly(lactic acid) blended with poly(hydroxyester ether),⁵ poly(ϵ -caprolactone),²⁷ poly(vinyl alcohol),^{28–31} and natural rubber latex.^{32,33} Kiatkamjornwong et al.³² used gelatinized cassava starch and used benzoyl peroxide to vulcanize the natural rubber. The natural rubber latex was stabilized with a nonionic surfactant. It was found that the compressive stress increased as the natural rubber content increased but there was no result reported for their density and impact strength. They et al.³³ used potato starch, wheat starch, and waxy corn starch and added a stabilizer to the natural rubber latex. They described the tensile properties and the densities of the foams but made no mention of the elongation at break. They also found that changes in the yield strain were not high. For example, the yield strain of potato starch foam with and without natural rubber latex was 2.63% and 1.78%, respectively. They concluded that natural rubber latex increases flexibility and the moisture resistance

Correspondence to: V. Tanrattanakul (varaporn.t@psu.ac.th).

Contract grant sponsor: Thailand Research Fund; contract grant number: RDG5050093.

Contract grant sponsors: Faculty of Science (Research Assistance Fund), Graduate School, Prince of Songkla University.

Journal of Applied Polymer Science, Vol. 000, 000–000 (2009)
© 2009 Wiley Periodicals, Inc.

of baked starch foams. Tensile properties of thermoplastic starch blended with glycerol and natural rubber latex were also reported.³⁴ The researchers reported that the modulus and tensile strength of thermoplastic starch decreased as the natural rubber content increased. The elongation at break of starch/natural rubber blends depended on the glycerol content. The blends containing 20% glycerol showed an increase in elongation at break after adding 2.5% natural rubber and higher rubber content decreased the elongation at break of the blends. The blends containing higher glycerol content, i.e., 30 and 40%, exhibited a decrease in the elongation at break for all blend compositions. It should be noted that it is necessary to add a plasticizer such as glycerol for producing thermoplastic starch foams but the plasticized thermoplastic starch foams are still relatively brittle so that there has been much research work on starch-based polymer blends as described earlier. Based on previous articles,^{32–34} natural rubber is not a plasticizer of starch. It is known that natural rubber is an impact modifier. Although foams prepared from starch blended with natural rubber have been reported,^{32,33} the application of natural rubber as the impact modifier of thermoplastic starch foams has not been published. Therefore, it is of interest to investigate the effect of the natural rubber content on the impact strength of the thermoplastic starch foams. As starch is a hydrophilic polymer, whereas natural rubber is a nonpolar polymer, a compatibilizer should be employed to improve the mechanical properties of blends of starch and natural rubber. There are many methods for compatibilization in the polymer blends. One of the more efficient methods for compatibilization is reactive blending that produces a graft copolymer at the interphase between the polymer A phase, i.e., starch, and the polymer B phase, i.e., natural rubber, during baking (foam preparation). This graft copolymer, sometimes, is called the *in situ* graft copolymer which means that the graft copolymer is synthesized during melt blending. In this case, both polymers (starch and natural rubber) must have a functional or reactive group to provide a chemical reaction. It is assumed that the double bonds in natural rubber and the hydroxyl groups in starch do interact and lead to a starch-g-NR graft copolymer. The hydroxyl groups in starch are active and can be used to prepare graft copolymers with other polymers such as polyacrylamide, polycaprolactone, poly(lactic acid), polystyrene, poly(methyl acrylate), polyacrylonitrile, and low-density polyethylene. Many initiators have been used to synthesize starch-based graft copolymers such as ceric ammonium nitrate,^{35–39} potassium persulfate,^{40,41} potassium permanganate,⁴² a mixture of potassium persulfate and benzoyl peroxide,^{43–46} and a mixture of cerium sulfate and potassium persul-

fate.⁴⁵ Because of the following reasons, we believe that potassium persulfate is a suitable agent to generate the graft copolymer in the starch/natural rubber blends. First, potassium persulfate is a good initiator for both starch and natural rubber. Double bonds in natural rubber and hydroxyl group in starch are activated by free radicals produced from potassium persulfate. Second, potassium persulfate is a water-soluble initiator that can disperse very well in the mixture of starch and natural rubber latex. Additionally, based on our knowledge, there has been no publication of graft copolymerization in the cassava starch/natural rubber foams by using potassium persulfate as an initiator.

The objectives of this research were, therefore, to evaluate the effect of potassium persulfate on graft copolymerization between native cassava starch and natural rubber latex and to determine the mechanical properties and characteristics of any prepared foams. The effect of natural rubber content and relative humidity were also studied. Foam density was uncontrolled so as to be in the same range after loading the natural rubber latex to observe the real effect of natural rubber on cassava starch foam under the same foam formulation. The effect of density on the impact strength was considered in terms of the specific impact strength derived from the impact strength normalized with the density. The article will be divided into two parts. The first part will focus on the synthesis and characterization of the starch-g-NR copolymer obtained from suspension grafting to verify the efficiency of potassium persulfate in graft copolymerization. The second part will describe the morphology, density, mechanical properties, and results of a soil burial test for foams. The presence of the starch-g-NR copolymer in the foams will be described in the first part.

EXPERIMENTAL

Materials

Native cassava starch containing 32% amylose was purchased from General Starch Co., Bangkok, Thailand. High ammonia grade natural rubber (NR) latex (60% dry rubber content) was purchased from Chalong Concentrated Latex Co., Songkla, Thailand. Foam formulation is listed in Table I. All chemicals including the NR content (dry rubber content) were weighed based on 100 parts by weight of starch. The concentration units of all chemicals and NR in the foams are given as parts per hundred (pph). NR latex was used as received and no latex stabilizer was employed.

T1

TABLE I
Foam Formulation

Material	Weight
Cassava starch	100
Sodium bicarbonate	0.1
Guar gum	1
Magnesium stearate	2
Glycerol	5
Natural rubber	0–35
Water	100

Synthesis of the starch-g-NR copolymer in suspension blending

To prove that the starch-g-NR copolymer occurred due to potassium persulfate (PPS), synthesis of this graft copolymer in the suspension blending was executed. Starch and water were added into a round bottomed three-necked flask at 50°C and stirred for 15 min to obtain homogeneous slurry. Continuous stirring was maintained at a constant speed for the entire experiment. NR latex, diluted with water, was added into the flask and stirred for 15 min before adding PPS into the solution. The PPS content was based on the total weight of starch and NR, i.e., 0.5 pph of PPS required 0.5 g of PPS in 100 g of starch/NR blend. The reaction time was 2 h. Polymer blends were precipitated by methanol, filtered, and then dried at 60°C until the weight was constant. The NR/starch blend was kept in the desiccator before characterization.

Investigation of graft copolymer

Nonreacted NR in the starch/NR blend was extracted by Soxhlet extraction in toluene at 110°C. Complete extraction was determined by dropping the extracted solution in methanol which is a nonsolvent of NR. If no precipitation was observed or methanol was clear, complete extraction had been performed. To substantiate the validity of the Soxhlet extraction technique, the same extraction method was applied to the starch/NR blend without PPS. The residue after extraction was dried at 60°C until the weight was constant and kept in the desiccator before use. FTIR and ¹H-NMR were employed to investigate the presence of the starch-g-NR copolymer. Starch, NR and the blend without extraction of nonreacted NR were also investigated by FTIR and ¹H-NMR. Deuterated chloroform and deuterated dimethyl sulfoxide were used as a solvent of NR and starch, respectively, for the ¹H-NMR analyses. Investigation of the graft copolymer in the foam samples with and without PPS was also carried out. Foam samples were extracted and characterized in a similar way to the methods described earlier.

Foam preparation

Starch was mixed with other solid chemicals as listed in Table I at room temperature for 10 min before adding the aqueous glycerol solution and the NR latex. In the case of adding PPS, the PPS aqueous solution was mixed with the aqueous glycerol solution and then added into the mixture. Foams were prepared by compression molding at 180°C under a pressure of 1000 psi (70 kg/cm²) for 5 min and the foam thickness was ~ 4 mm.

Mechanical properties test and characterization of foams

An Izod impact test was performed according to ASTM D256. Dimensions of the un-notched specimens were 12.7 mm × 63.5 mm × 4 mm. The experiment was carried out by using a 2 J pendulum and six to eight specimens were tested for one sample. Flexural properties were determined based on ASTM D790 (three point bending test). The dimension of the specimens was 30 mm × 150 mm × 4 mm and the length of the support span was 80 mm. Testing speed was 2.5 mm/min and 10 specimens were tested for one sample. Mechanical properties were tested at 25°C ± 1°C and 60% ± 5% RH. Density was determined as a ratio between the mass (weight) and volume and investigated at 27°C ± 1°C and 70% ± 5% RH. The specimen dimension was 30 mm × 150 mm × 4 mm. Before testing of the mechanical properties, specimens were stored for 7 days at ambient temperature (28°C ± 1°C) and at two different relative humidities: 40% ± 3% RH and 70% ± 8% RH. The lower RH was controlled by silica gel in the desiccator. The higher RH was the relative humidity of the ambient environment in the laboratory. Temperature and relative humidity were recorded every day at 8 am, 12 pm, 3 pm, and 6 pm. The average values have been reported.

A fractured surface of the foam was recorded by a scanning electron microscope. The molecular weight of the NR extracted from the foam specimens was evaluated by gel permeation chromatography. Foam specimens were ground to a powder and dissolved by stirring in toluene at 60°C for 48 h. The solution was filtered using a 325 mesh stainless steel sieve. Then, the NR solution was precipitated in methanol and dried at 60°C. NR was dissolved in tetrahydrofuran to obtain the solution concentration of a 0.5 wt %. The polymer solution was filtered by using a nylon filter before injection into the equipment that had a refractive index detector. The flow rate of the solvent (mobile phase) was 1 mL/min and the temperature of the column was 40°C. The standard curve was obtained from standard polystyrene (known molecular weight polystyrene).

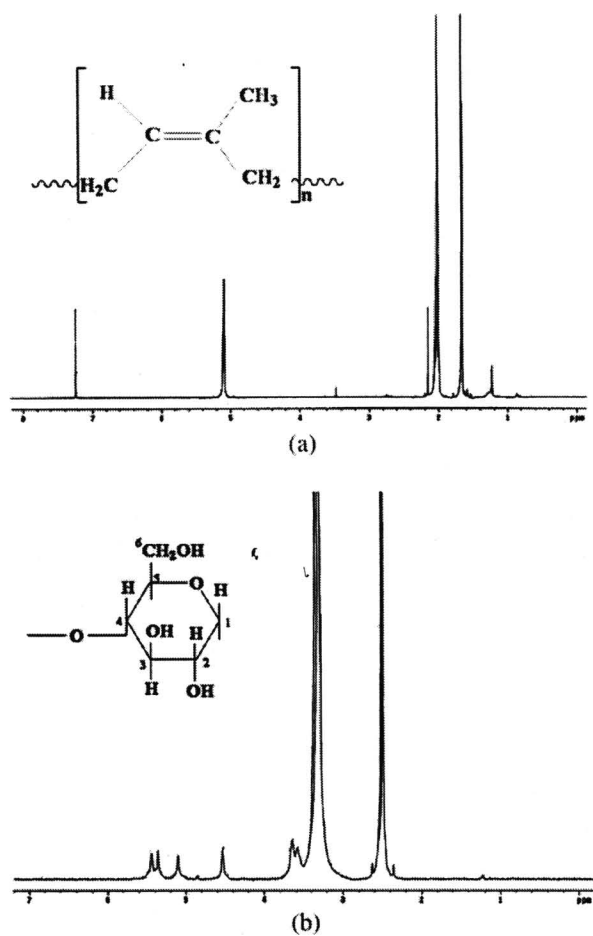


Figure 1 ¹H-NMR spectra of NR dissolved in deuterated chloroform (a) and starch dissolved in deuterated dimethyl sulfoxide (b).

Soil burial test of foams

Soil was packed into 40 cm × 60 cm × 20 cm (width × length × height) baskets. The specimen width and length was 30 mm and 150 mm, respectively, specimens were placed in the middle of the basket and six specimens were used for each sample. Baskets of soil were exposed to sunlight and rain, and the dampness of the soil was observed and controlled

by watering every 4 days if necessary. Specimens were removed every 2 weeks and cleaned by brushing and blown dry with air. Changes in the specimens were observed by eye and recorded by a digital camera. Cleaning with water was not possible because starch absorbs water. Changes in specimen weight after soil burial were not measured because it was not possible to remove soil completely from the specimens without cleaning with water. After observation, specimens were replaced into the soil.

RESULTS AND DISCUSSION

Graft copolymer

The assumption that the addition of PPS into the starch/NR blend led to the starch-g-NR should be verified before preparing the foams. Generally, synthesis of the graft copolymer using melt blending is rather difficult. Therefore, suspension blending was carried out between starch and the NR latex.

The starch-g-NR copolymer was successfully produced by suspension blending based on its NMR and FTIR characteristics. The ¹H-NMR spectrum of NR dissolved in deuterated chloroform and starch dissolved in deuterated dimethyl sulfoxide are demonstrated in Figure 1(a,b), respectively. The ¹H-NMR assignment of NR and starch are listed in Table II.^{47–49} As described in the experimental section, validation of the Soxhlet extraction requires a sample without PPS. In this case, no NR must be observed in the sample after extraction. The residue obtained after Soxhlet extraction was dissolved in deuterated dimethyl sulfoxide and deuterated chloroform to investigate the presence of starch and natural rubber in the residue. Figure 2 shows ¹H-NMR spectra of this residue. It was found that the sample without PPS after Soxhlet extraction contained only starch, represented by the spectrum “a” in Figure 2 which showed all chemical shifts of starch as described in Table II. In contrast, the residue dissolved in deuterated chloroform (the spectrum “b” in Fig. 2) did not show the characteristics of NR. This result confirmed that there was no NR in the

F1

T2

F2

TABLE II
¹H-NMR Assignments for NR and Cassava Starch

Material	Solvent	δ (ppm)	Assignment
NR	Deuterated chloroform (CDCl ₃)	5.10	C=CH
		2.01	CH ₂
		1.65	CH ₃
Cassava starch	Deuterated dimethyl sulfoxide (DMSO- <i>d</i> ₆)	5.10	H-1
		5.44, 5.36	OH-3,2
		4.53	OH-6
		3.65–3.30	H-6,5,4,3,2

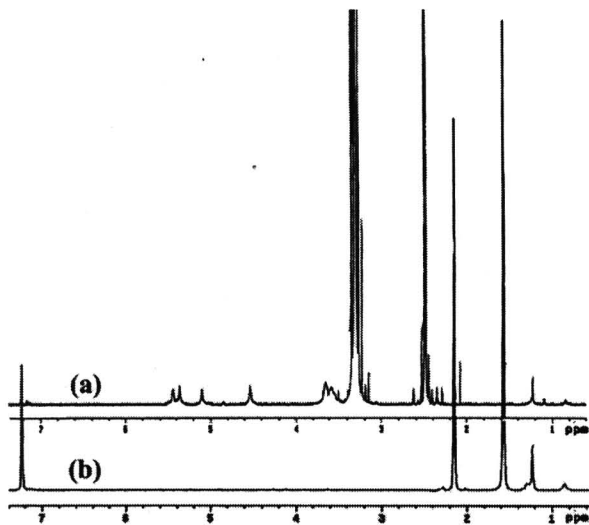


Figure 2 ¹H-NMR spectra of the residue from a Soxhlet extraction of a starch/NR blend without PPS dissolved in deuterated dimethyl sulfoxide (a) and in deuterated chloroform (b).

blend without PPS after Soxhlet extraction and also proved that the Soxhlet extraction procedure was valid.

The presence of starch-g-NR copolymer was proved by Figure 3. Figure 3 represents the spectra obtained from the residue after Soxhlet extraction of the blend containing PPS and shows that it composed of both starch and NR. The starch component was observed in the spectrum “a” which derived from the residue dissolved in deuterated dimethyl sulfoxide, and this spectrum looked similar to the spectrum in Figure 1(b) and the spectrum “a” in Figure 2. The spectrum “b” was derived from the residue dissolved in deuterated chloroform and it showed the chemical shifts at δ 5.10 ppm, 2.01 ppm, and 1.65 ppm which are the characteristics of NR. It should be noted that the spectrum “b” in both Figures 2 and 3 were derived

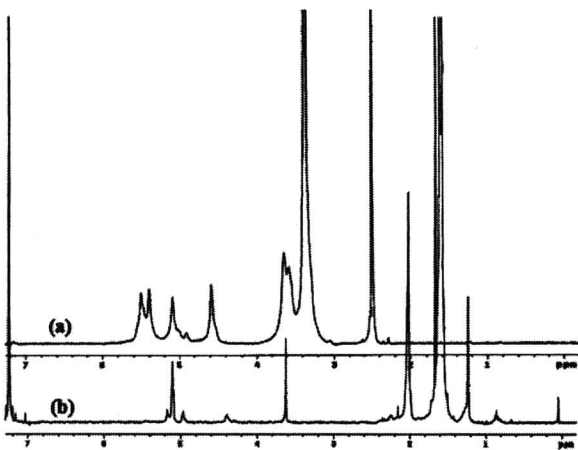


Figure 3 ¹H-NMR spectra of the residue from a Soxhlet extraction of a starch/NR blend containing 0.5 pph of PPS dissolved in deuterated dimethyl sulfoxide (a) and in deuterated chloroform (b).

from the residue dissolved in deuterated chloroform which is a solvent of NR but they showed different characteristic. The blend containing PPS after Soxhlet extraction still exhibited NR due to grafting reaction between NR and starch resulting in the nonextractable NR in the residue. On the other hand, after Soxhlet extraction, NR in the blend without PPS was completely removed from the blend as shown in Figure 2 (spectrum “b”). The ¹H-NMR spectrum of virgin starch dissolved in deuterated chloroform was investigated to confirm the appearance of the spectrum “b” in Figure 2. The virgin starch was dispersed in deuterated chloroform for 24 h, filtered, and characterized by NMR. The derived ¹H-NMR spectrum of the solution was identical to the spectrum “b” in Figure 2 but is not shown in this article.

FTIR characterization was performed by using the samples before and after Soxhlet extraction. Table III shows the FTIR assignment of NR and starch.^{40,50,51}

T3

TABLE III
FTIR Assignments for NR and Cassava Starch

Material	Wavenumber (cm ⁻¹)	Assignment
NR	3429	O—H stretching
	2926, 2925, 2854	C—H stretching
	1720, 1666	C=C stretching
	1448	C—H deformation (CH ₃)
	1374	C—H deformation (CH ₂)
	836	C—H stretching (C=CH)
Cassava starch	3417	O—H stretching
	2930	C—H asymmetric stretching
	1646	O—H bending (H ₂ O)
	1458, 1370	C—H deformation (CH ₂ bending)
	1159, 1084, 1010	C—O stretching (C—O—C, C—O—H)

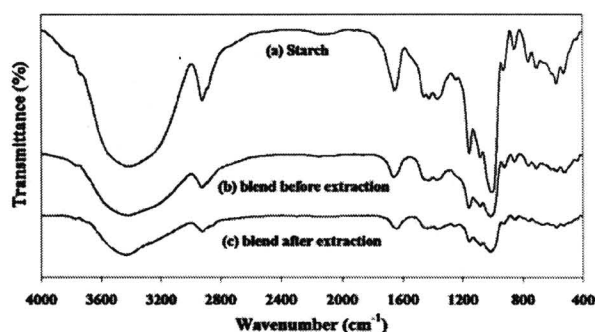


Figure 4 FTIR spectra of virgin starch (a), a starch/NR blend containing 0.5 pph of PPS before Soxhlet extraction (b), and after Soxhlet extraction (c).

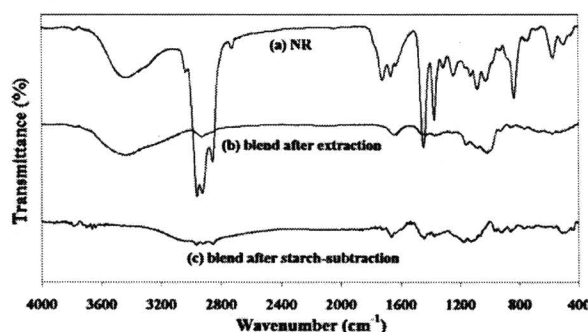


Figure 5 FTIR spectra of NR (a), a starch/NR blend containing 0.5 pph of PPS after Soxhlet extraction (b), and the subtraction between starch and the blend after Soxhlet extraction (c).

The FTIR spectra of the blends before and after Soxhlet extraction were similar to that of starch alone as shown in Figure 4. As a result, a spectrum subtraction was applied as shown in Figure 5. The spectrum of the blend after Soxhlet extraction (residue) was subtracted from the spectrum of starch (spectrum "c": starch-subtraction in Fig. 5). There was a trace of an NR component in this subtracted spectrum as appeared at $2926\text{--}2854\text{ cm}^{-1}$. Therefore, it was confirmed that there had been a starch-g-NR copolymer formed during blending of the starch and NR in the presence of PPS.

Although there was a graft copolymer synthesized during the suspension blending, it may not occur during the melt blending. Foam specimens containing PPS were investigated for the presence of the starch-g-NR copolymer. $^1\text{H-NMR}$ spectra of the foam residue after extraction and being dissolved in the foam containing PPS (the spectrum "a") showed strong peaks at δ 5.10 ppm, 2.01 ppm, and 1.65 ppm which were assigned to NR. On the other hand, no NR traces were observed in the foam without PPS (the spectrum "b") and this spectrum was similar to the spectrum "b" in Figure 2. These results confirmed that there was a graft copolymer present in the prepared foams.

Foam morphology

SEM micrographs of foams containing 0, 15, and 35 pph of NR are demonstrated in Figure 7(a–c), respectively. Generally, all foams showed skin-core morphology. The depth of a skin layer was ~ 0.5 mm and much smaller cellular structures were noticed in the skin layer. The most remarkable change due to the addition of NR was the cellular structure in the core portion. The cell size became smaller and denser as the NR content increased. A phase separation of NR and starch was clearly seen

in the foam containing 35 pph of NR [Fig. 7(c)]. A phase separation in thermoplastic starch blended with NR latex has been reported elsewhere.³⁴ This study did not add any stabilizer with the NR latex, whereas other researchers^{32,33} stabilized NR latex by adding nonionic surfactants.

The effect of the NR content on foam morphology observed in the core area is presented in Figure 8. Thermoplastic starch foam showed a smooth and homogeneous surface as demonstrated in Figure 8(a). The thicker cell wall and inhomogeneous surface were derived after adding 15 pph of NR as shown in Figure 8(b,c), respectively. It appeared that the cell wall and phase separation increased with an increasing NR content. A very thick cell wall [Fig. 8(d)] and a higher phase separation [Fig. 8(e)] were found in the foams containing 35 pph of NR. Some specimens of this composition showed gross phase

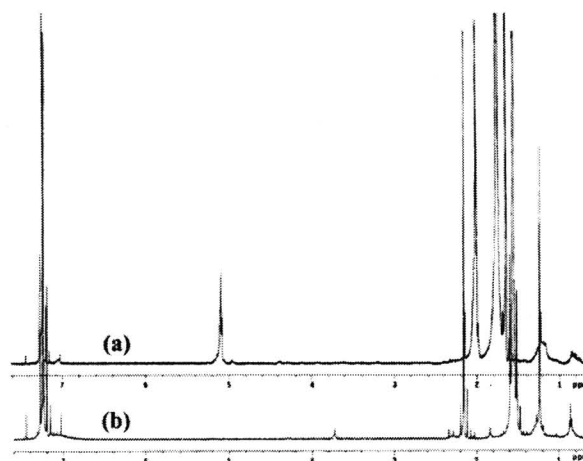


Figure 6 $^1\text{H-NMR}$ spectra of starch/NR foams after Soxhlet extraction and dissolved in deuterated chloroform: the foam containing 0.025 pph of PPS (a) and the foam without PPS (b).

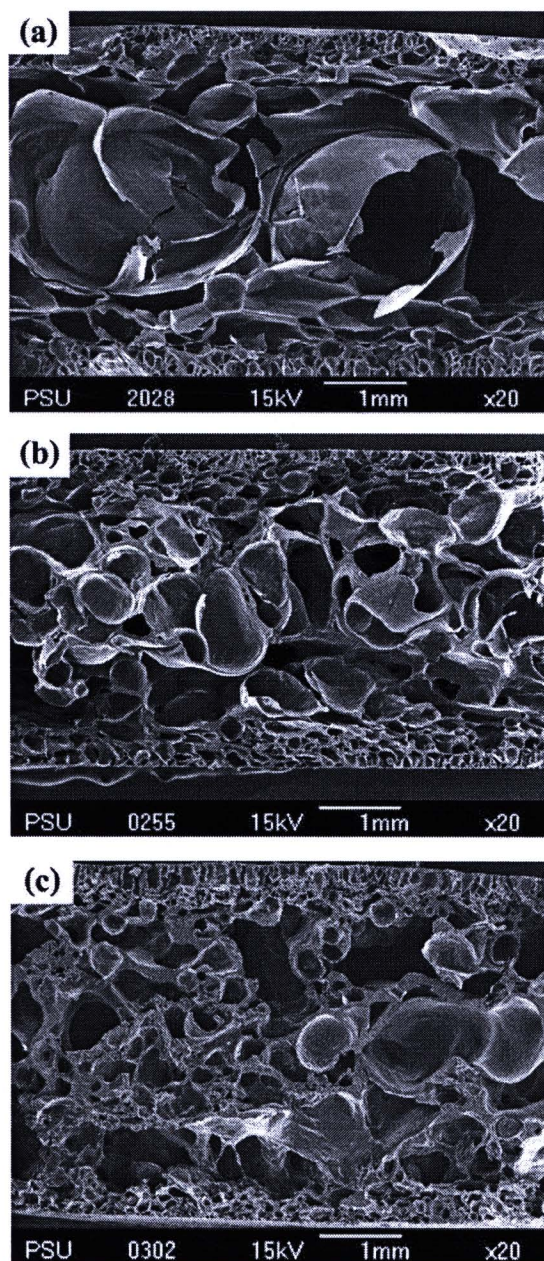


Figure 7 SEM micrographs of starch/NR foams containing different NR contents, showing foam morphology: 0 pph (a), 15 pph (b), and 35 pph (c).

segregation as shown in Figure 8(f). As the content of the blowing agent did not increase with increasing NR content, the formation of foam might be different. Furthermore, sodium bicarbonate may not be a good blowing agent for NR. These led to a more dense foam and thicker cell wall in the foams containing NR. However, based on a preliminary study, an increase in sodium bicarbonate content from 0.1

to 0.5 pph did not significantly decrease the density of foams with and without NR.

Effect of NR content on mechanical properties

It is well known that NR is an impact modifier for plastics; therefore, addition of NR into thermoplastic starch should increase its impact strength. Undoubtedly, the impact strength of starch/NR foams increased with increasing NR content (Fig. 9). With regard to the foam morphology described earlier, a thicker foam cell wall was obtained after adding NR. This resulted in a higher toughness of the starch/NR foams than found in the pure thermoplastic starch foams. The high-phase separation of NR did not diminish the impact strength of the foams. The relative humidity had a significant effect on the impact strength of foams with and without NR. Storing the samples at higher relative humidity produced higher impact strength. This was because starch absorbed moisture from the environment and water is a plasticizer of thermoplastic starch. A greater toughness is obtained from plasticized thermoplastic starch.

The foam density increased with increasing NR content and there was little effect of relative humidity on the foam density (Table IV). The density of the cassava starch foam prepared in this study was in the same range as the wheat starch foam,³³ i.e., 0.20 g/cm³. By adding NR latex (27 wt % of water),³³ the density of that wheat starch foam increased to 0.22 g/cm³ and was comparable to the foam described here that contained 15 pph of NR. As foams have shown significant discrepancies in density, this may provide for a contradictory opinion of the effect of the NR content. Consequently, the specific impact strength (impact strength (J/m²) normalized with density (g/cm³)) was considered and is listed in Table V. It was found that the specific impact strength of foams was enhanced by the addition of NR. All blends showed higher specific impact strength than thermoplastic starch foams stored at 40% RH. Only the high NR content (30 and 35 pph) improved its specific impact strength after storage at 70% RH. The addition of a low NR content, i.e., 15–25 pph, exhibited a slight decrease in the specific impact strength. There were two factors involved in the enhancement of the impact strength of foams stored at 70% RH: absorption of moisture by the thermoplastic starch and the contribution made by the NR content. The lower specific impact strength at relatively low NR content (15–25 pph) may be due to the NR reducing the absorption of moisture by the foam. The higher NR content (30 and 35 pph) provided more phase separation so that the thermoplastic starch phase could absorb more moisture.

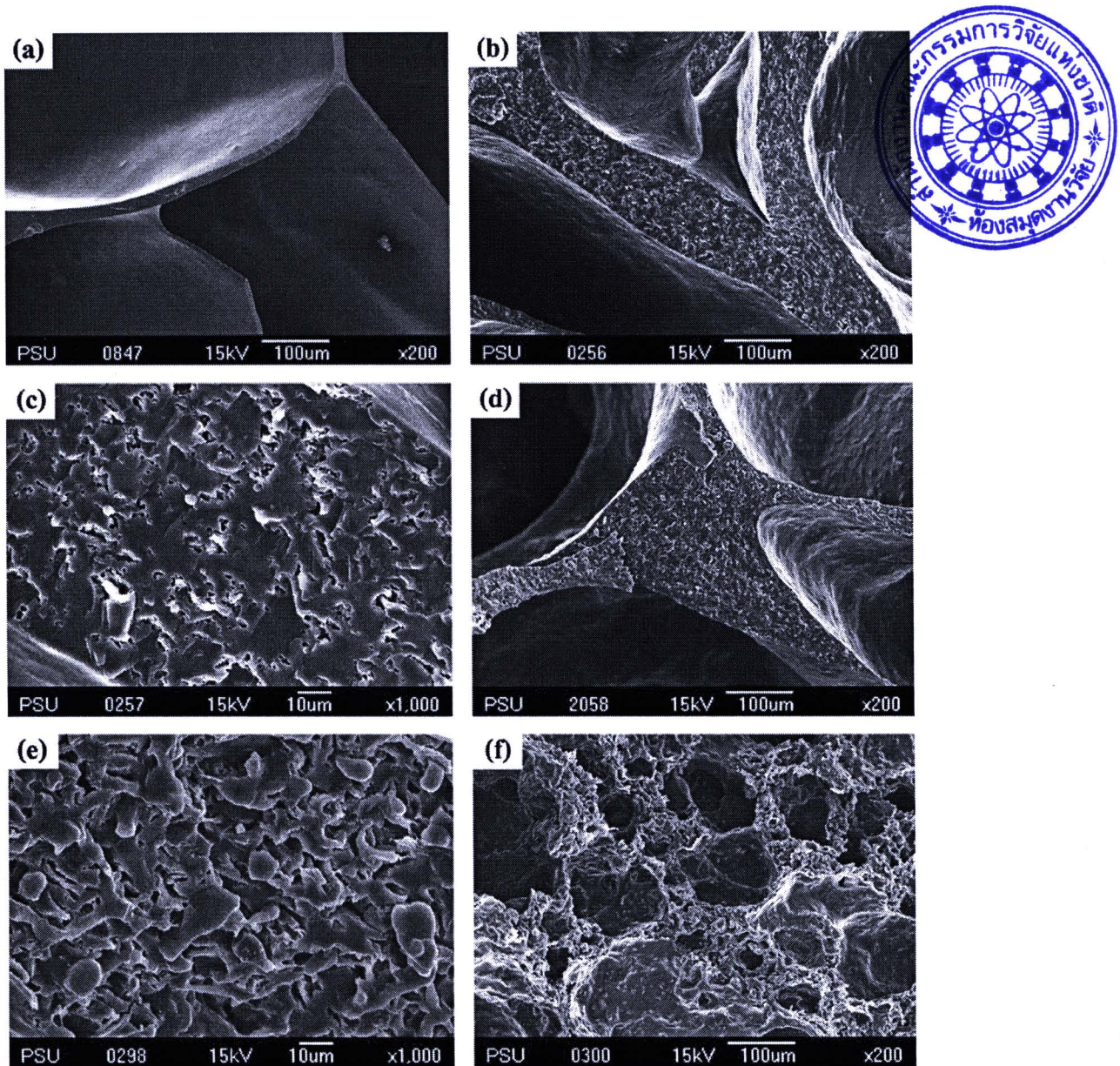


Figure 8 SEM micrographs at the core area of foams containing different NR contents, showing more phase separation as the NR content increased: 0 pph (a), 15 pph (b and c), and 35 pph (d–f).

The effect of NR on the flexural properties is tabulated in Table IV. Unexpectedly, the flexural modulus (E) of thermoplastic starch foam increased after blending with NR and there was a maximum modulus for each relative humidity. It appeared that 15 and 20 pph were the optimum content of NR for improving the flexural properties when stored at 40 and 70% RH, respectively. The lower flexural modulus of foams containing the higher NR content was probably due to more phase separation. However, the modulus values of foams containing NR were

not much different after passing the maximum modulus. All foams containing NR showed higher flexural modulus than foams without NR. This behavior was unique because normally addition of a softer polymer (NR) should not increase the modulus of a hard matrix (thermoplastic starch). The reduction in the tensile modulus of thermoplastic starch due to the addition of NR has been reported.^{33,34} As the density increased when the NR content increased, one might claim that the higher density caused a higher modulus. As a result, the

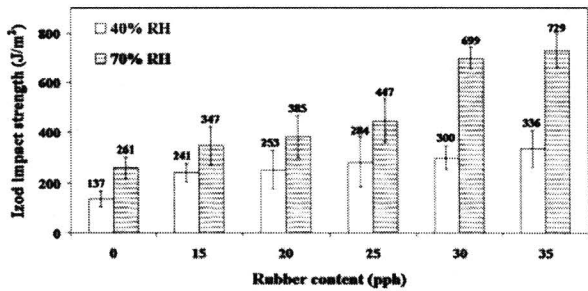


Figure 9 Effect of relative humidity of the storage conditions on the impact strength of starch/NR foams without PPS.

specific modulus was taken into account. It was found that the specific modulus decreased as the NR content increased when foams were stored at 40% RH, but foams containing 15 and 20 pph of NR showed a higher specific modulus than foams without NR when stored at 70% RH. The specific modulus was 802, 1025, and 890 MPa cm³/g for foams containing 0, 15, and 20 pph of NR, respectively. This was a synergistic behavior of the present foams and the result revealed that the prepared starch/NR blend was compatible at a certain composition with regard to the flexural modulus. Foams without NR stored at 40% RH exhibited a higher flexural modulus than those stored at 70% RH. A similar result has been reported.³³ This was most likely due to the moisture effect: lower humidity providing lower plasticization. The relative humidity produced a lower effect on the flexural modulus in foams containing NR. In practice, the addition of NR should reduce the ability of the foams to absorb water and this effect was proven by the soil burial test. The addition of NR did not show significant changes in the maximum flexural stress ($\sigma_{\max}$). The maximum value appeared in foams containing 15 and 20 pph of NR when stored at 40 and 70% RH, respectively. The maximum flexural stress at 40% RH tended to be higher than the one at 70% RH. As predicted, the specific flexural strength of foams decreased as the

NR content increased. This agreed with the general knowledge that rubber will toughen plastics, whereas rubber reduces the strength of the blends. The flexural strain (ϵ_b) recorded at the strain at break was in the same range for all foams. Thermoplastic starch foams prepared by Shey et al.³³ also showed a slight increase in tensile yield stress and tensile yield strain after adding NR latex and those values are in the same range as in this study. However, a comparison between the tensile and the flexural properties should not be made due to different type of loading. In this study, NR acted as only an impact modifier and did not notably increase the flexural strain of the thermoplastic starch. Relative humidity also showed no influence on the flexural strain.

Obviously, although the impact strength increased with increasing density, the flexural properties did not relate to the density in the same manner as the impact strength. It could be expected that a higher foam density should provide a higher flexural modulus in addition to its strength. Remember that there are many factors involved in the mechanical properties such as the homogeneity of the foams and the type of polymer and rubber. In addition, the NR/starch blend in this study was one kind of rubber toughened plastic and, in general, not all mechanical properties are improved in the rubber toughened plastics. For example, epoxidized NR had increased impact strength but decreased the tensile properties of nylon 6.⁵² The higher specific flexural modulus in foams revealed good interfacial adhesion between the continuous phase (starch) and the discontinuous phase (NR). As mentioned earlier, the effect of foam density was questionable. Because the aim of this study was to determine how much NR was able to be added into the same formulation of the starch compound, it was unnecessary to obtain a similar range of foam density and the effect of foam density on the mechanical properties has been already discussed in terms of the specific impact strength. For that reason, it can be clearly stated that NR was able to increase the impact strength and the flexural modulus of thermoplastic starch foams.

TABLE IV Density and Flexural Properties of Starch/NR Foams Without PPS and Stored at 40 and 70% RH for 7 Days Before Testing								
NR (pph)	Density (g/cm ³)		E (MPa)		$\sigma_{\max}$ (MPa)		ϵ_b (%)	
	40% RH	70% RH	40% RH	70% RH	40% RH	70% RH	40% RH	70% RH
0	0.1838 ± 0.0178	0.1845 ± 0.0112	249 ± 47	148 ± 19	3.34 ± 0.77	2.98 ± 0.27	1.75 ± 0.34	1.80 ± 0.21
15	0.2706 ± 0.0155	0.2723 ± 0.0155	325 ± 34	279 ± 42	4.29 ± 0.59	3.19 ± 0.55	1.68 ± 0.13	1.46 ± 0.13
20	0.3103 ± 0.0137	0.3178 ± 0.0209	296 ± 35	283 ± 25	3.82 ± 0.46	3.35 ± 0.42	1.85 ± 0.31	1.85 ± 0.46
25	0.3434 ± 0.0156	0.3680 ± 0.0176	257 ± 30	251 ± 26	3.19 ± 0.50	3.15 ± 0.51	1.69 ± 0.26	1.70 ± 0.21
30	0.3896 ± 0.0209	0.4108 ± 0.0206	265 ± 30	221 ± 32	3.28 ± 0.46	2.47 ± 0.44	2.26 ± 0.20	2.00 ± 0.23
35	0.4201 ± 0.0147	0.4215 ± 0.0149	261 ± 25	219 ± 25	3.07 ± 0.32	2.56 ± 0.31	2.06 ± 0.23	2.37 ± 0.18

TABLE V
Specific Impact Strength of Foams with and Without PPS and Stored at 40 and 70% RH for 7 Days Before Testing

Relative humidity (%)	NR (pph)	Specific impact strength ($\times 10^{-3}$ J m/kg)	
		0 pph of PPS	0.025 pph of PPS
40	0	745	–
	15	891	1095
	20	815	961
	25	827	1091
	30	770	1412
	35	800	1255
70	0	1415	–
	15	1274	1563
	20	1211	1585
	25	1215	2026
	30	1702	1910
	35	1730	2107

Effect of PPS on mechanical properties

The density of foams containing PPS is revealed in Table VI and was similar to that of foams without PPS. The addition of PPS increased the impact strength of all foams stored at 40 and 70% RH and the impact strength increased with increasing NR content (Fig. 10). This was due to the presence of the graft copolymer (starch-g-NR copolymer) in the foam samples. The graft copolymer occurred at the interphase between NR and starch and acted as a compatibilizer of the starch/NR blend, leading to higher compatibility of the blends. The starch-g-NR copolymer also increased the interfacial adhesion between NR and starch. Theoretically, the *in situ* graft copolymer will transfer the applied load from the weaker phase (NR) to the stronger phase (starch), resulting in a higher toughness. The impact strength of foams stored at 70% RH was still higher than those stored at 40% RH. The specific impact strength of all foams increased after adding PPS as shown in Table V. All blends exhibited higher specific impact strength than the thermoplastic starch

and the improvement appeared in the samples stored at both low and high relative humidity. These data substantiated the strong influence of the starch-g-NR copolymer on the impact strength of starch/NR foams.

Flexural properties of foams containing PPS are listed in Table VI. Trends of changes in flexural properties due to the NR content were similar to foams without PPS as described previously. The 20 pph of NR seemed to be the best foam owing to its flexural modulus and flexural strength. Insignificant changes in the flexural strain were noticed and all remaining foams showed low strain at break. Comparing the results in Tables IV and VI, PPS decreased the flexural modulus and the flexural strength of foams. It was suspected that chain scission of NR may have taken place after adding PPS because foam samples became slightly yellowish. Foams containing 15 pph of NR and 0.025–0.10 pph of PPS were investigated. Nonreacted NR was extracted from foam samples and characterized by GPC. The average molecular weight (M_n and M_w) and molecular weight distribution (M_w/M_n) of free NR (nongrafted NR) are displayed in Table VII. The molecular weight of the starch-g-NR copolymer was not determined because of the presence of starch in the graft copolymer that resulted in no dissolution in tetrahydrofuran. Undoubtedly, PPS caused a decrease in the molecular weight of NR. This was attributed to its lower flexural modulus and strength. The reduction in molecular weight of NR reduced only the flexural properties, whereas the foam toughness was improved by adding PPS. These results indicated that the starch-g-NR copolymer and NR played different roles in different mechanical properties. As stated earlier, NR is the impact modifier and always improves the impact strength of polymer blends. The impact modifier may not, however, increase the ductility or flexibility of the blends, as occurred in this study. There is no doubt that NR was a good impact modifier for thermoplastic starch and the starch-g-NR copolymer had increased impact strength but not flexural

TABLE VI
Density and Flexural Properties of Starch/NR Foams Containing 0.025 pph of PPS and Stored at 40 and 70% RH for 7 Days Before Testing

NR (pph)	Density (g/cm ³)		E (MPa)		σ_{max} (MPa)		ϵ_b (%)	
	40% RH	70% RH	40% RH	70% RH	40% RH	70% RH	40% RH	70% RH
15	0.2320 $\pm$ 0.0096	0.2393 $\pm$ 0.0132	230 $\pm$ 25	164 $\pm$ 15	2.96 $\pm$ 0.38	1.49 $\pm$ 0.14	1.91 $\pm$ 0.39	1.36 $\pm$ 0.21
20	0.3110 $\pm$ 0.0295	0.3117 $\pm$ 0.0226	292 $\pm$ 30	202 $\pm$ 22	3.68 $\pm$ 0.38	2.52 $\pm$ 0.33	1.69 $\pm$ 0.21	2.29 $\pm$ 0.21
25	0.3438 $\pm$ 0.0289	0.3460 $\pm$ 0.0434	270 $\pm$ 27	205 $\pm$ 18	3.49 $\pm$ 0.40	2.54 $\pm$ 0.23	1.80 $\pm$ 0.36	2.32 $\pm$ 0.18
30	0.3889 $\pm$ 0.0231	0.3901 $\pm$ 0.0250	225 $\pm$ 31	154 $\pm$ 22	2.79 $\pm$ 0.29	1.79 $\pm$ 0.23	1.79 $\pm$ 0.22	2.92 $\pm$ 0.52
35	0.4000 $\pm$ 0.0185	0.4035 $\pm$ 0.0231	180 $\pm$ 18	175 $\pm$ 28	2.07 $\pm$ 0.26	1.97 $\pm$ 0.39	2.66 $\pm$ 0.28	2.12 $\pm$ 0.25

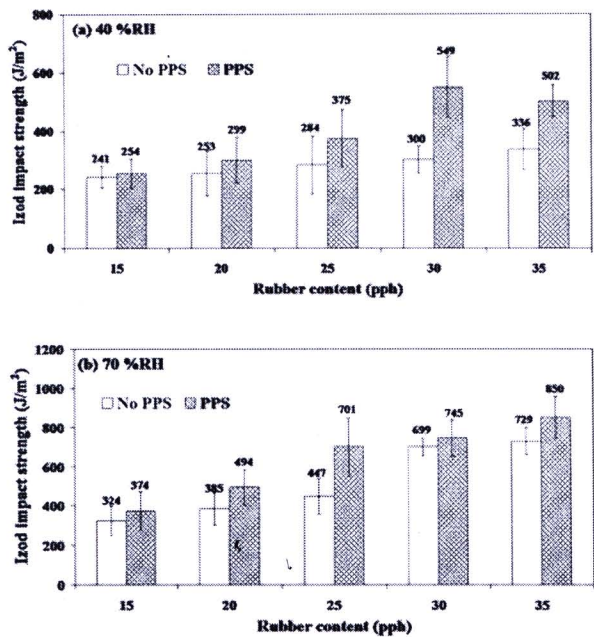


Figure 10 Effect of PPS on the impact strength of starch/NR foams stored for 7 days at 40% RH (a) and 70% RH (b).

properties. Flexural properties of foams were seemingly governed by NR content, the molecular weight of NR and foam morphology.

It was reasonable to compare samples containing 15 pph of NR to that without NR due to their small difference in density, i.e., density of the foam with and without NR was 0.27 and 0.18 g/cm³, respectively. For this comparison, it was remarkable that NR increased the impact strength from 137 to 241 J/m² and from 261 to 347 J/m² when stored at 40 and 70% RH, respectively. Moreover, the presence of the starch-g-NR copolymer provided a higher toughness, i.e., from 137 to 254 J/m² and from 261 to 374 J/m² when stored at 40 and 70% RH, respectively.

Benzoyl peroxide (BPO) was used as an initiator in a preliminary study. It was found that foam density of the blends increased with increasing BPO content because NR phase was crosslinked by BPO. BPO provided lower impact strength than PPS

TABLE VII
Effect of PPS Content on the Molecular Weight of NR in Starch/NR Foams

PPS (pph)	M_w	M_n	M_w/M_n
0	1,990,000	669,000	2.97
0.025	1,131,000	389,000	2.91
0.05	313,000	111,000	2.82
0.10	256,000	106,000	2.42

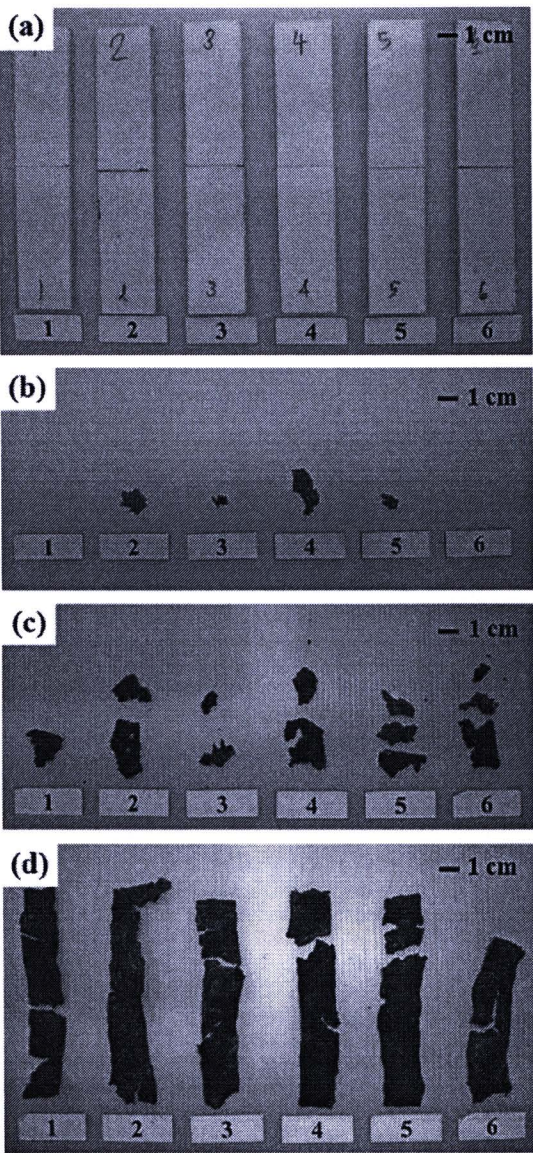


Figure 11 Specimens before and during soil burial testing: foams before testing (a), foams containing 15 pph of NR at the 16th week (b), foams containing 15 pph of NR and 0.025 pph of PPS at the 22nd week (c), and foams containing 35 pph of NR at the 22nd week (d). [Color figure can be viewed in the online issue, which is available at www.interscience.wiley.com.]

AQ3

although BPO provided higher foam density than PPS. It is not the scope of this article to compare different initiators, particularly one showing lower impact resistance.

Degradation of foams

Degradation was evaluated by the soil burial testing. Observations of the physical changes of the foams

were the major criterion for determining degradation. It was not difficult to find foam specimens in soil after burial although soil adhered to the foam surfaces. Figure 11(a) represents a foam specimen before the soil burial test. The original dimension was 30 mm × 150 mm × 4 mm (width × length × thickness). It was found that the cassava starch foam was completely biodegraded after the 8th week because the foam specimens could not be found. Figure 11(b) shows photographs of foams containing 15 pph of NR after the burial test for 16 weeks. These starch/NR foams were almost fully biodegraded. Specimen no. 1 and 6 were not found in the soil and the other specimens were reduced to a tiny piece. Specimen no. 2–5 could not be found after the 18th week, to indicate full biodegradation. The addition of PPS delayed the biodegradation of starch/NR foams. Figure 11(c) shows foams containing 15 pph of NR and 0.025 pph of PPS after a soil burial test for 22 weeks. Biodegradation took place by ~ 80% based on the remaining specimens. The impediment on the biodegradation of polymer blends due to the *in situ* graft copolymer has also been observed with LDPE/cassava starch blends containing PPS.⁵³ A higher NR content needed a longer time for degradation. Figure 11(d) shows foams containing 35 pph of NR after a soil burial test for 22 weeks. Approximately 20% biodegradation occurred and most degradation was observed on the surface of the specimens. The presence of NR reduced the water absorption of foams. The decrease in water absorption caused a lower biodegradation rate of starch because water is essential for fungus growth and the physical factors affecting the activity of the enzymes. As a consequence of the differences in the chemical structures and composition of starch and NR, their biodegradation mechanisms should be dissimilar. It was not in the scope of this study to elucidate their biodegradation mechanisms.

CONCLUSIONS

It was confirmed that the graft copolymer (starch-g-NR copolymer) was produced in this study by suspension blending and melt blending. NR acted as an impact modifier for thermoplastic starch and also increased the flexural modulus of the foams. No enhancement in ductility or elongation at break was noticed. A higher NR content provided higher impact strength under certain conditions. The graft copolymer had enhanced impact strength but decreased flexural properties because PPS reduced the molecular weight of NR. Although the density of the foams was different due to their different NR contents, it was confirmed that NR and the starch-g-NR copolymer increased the impact strength and the flexural modulus of thermoplastic starch foams with

regard to the specific impact strength and the specific flexural modulus. The soil burial tests indicated that foams containing 15 pph of NR were classifiable as a biodegradable polymer because it was biodegraded within 18 weeks after soil burial.

Authors thank Prof. Brian Hodgson for assistance with the English.

References

1. Lourdin, D.; Valle, G. D.; Colonna, P. *Carbohydr Polym* 1995, 27, 261.
2. Shogren, R. L.; Lawton, J. W.; Doane, W. M.; Tiefenbacher, K. F. *Polymer* 1998, 39, 6649.
3. Lawton, J. W.; Shogren, R. L.; Tiefenbacher, K. F. *Cereal Chem* 1999, 76, 682.
4. Glenn, G. M.; Orts, W. J. *Ind Crops Prod* 2001, 13, 135.
5. Willett, J. L.; Shogren, R. L. *Polymer* 2002, 43, 5935.
6. Thuwall, M.; Boldizar, A.; Rigdahl, M. *Carbohydr Polym* 2006, 63, 441.
7. Bhathagar, S.; Hanna, M. A. *Eng Process* 1996, 73, 601.
8. Glenn, G. M.; Hsu, J. *Ind Crops Prod* 1997, 7, 37.
9. Zhou, J.; Song, J.; Parker, R. *Carbohydr Polym* 2006, 63, 466.
10. Tatarka, P. D.; Cunningham, R. L. *J Appl Polym Sci* 1996, 67, 1157.
11. Fang, Q.; Hanna, M. A. *Ind Crops Prod* 2001, 13, 219.
12. Arif, S.; Burgess, G.; Narayan, R.; Harte, B. *Packag Technol Sci* 2007, 20, 413.
13. Pushpadass, H. A.; Babu, P. G.; Weber, R. W.; Hanna, M. A. *Packag Technol Sci* 2008, 2, 171.
14. Bhathagar, S.; Hanna, M. A. *Ind Crops Prod* 1995, 4, 71.
15. Senna, M. M.; Yossef, A. M.; Hossom, F. M.; El-Naggar, A. W. *J Appl Polym Sci* 2007, 106, 3273.
16. Alfani, R.; Iannace, S.; Nicolais, L. *J Appl Polym Sci* 1998, 68, 739.
17. Cha, J. Y.; Chung, D. S.; Seib, P. A.; Flores, R. A.; Hanna, M. A. *Ind Crops Prod* 2001, 14, 23.
18. Xu, Y.; Hanna, M. A. *Carbohydr Polym* 2005, 59, 521.
19. Fang, Q.; Hanna, M. A. *Bioresour Technol* 2001, 78, 115.
20. Preechawong, D.; Peesan, M.; Supaphol, P.; Rujiravanit, R. *Carbohydr Polym* 2005, 59, 329.
21. Guan, J.; Eskridge, K. M.; Hanna, M. A. *Ind Crops Prod* 2005, 22, 109.
22. Ganjyal, G. M.; Weber, R.; Hanna, M. A. *Bioresour Technol* 2007, 98, 3176.
23. Zhang, J. F.; Sun, X. *J Appl Polym Sci* 2007, 106, 857.
24. Zhang, J. F.; Sun, X. *J Appl Polym Sci* 2007, 106, 3058.
25. Lee, S. Y.; Chen, H.; Hanna, M. A. *Ind Crops Prod* 2008, 28, 95.
26. Hao, A.; Geng, Y.; Xu, Q.; Lu, Z.; Yu, L. *J Appl Polym Sci* 2008, 109, 2679.
27. Preechawong, D.; Peesan, M.; Supaphol, P.; Rujiravanit, R. *Polym Test* 2004, 23, 651.
28. Shogren, R. L.; Lawton, J. W.; Doane, W. M.; Tiefenbacher, K. F. *J Appl Polym Sci* 1998, 68, 2129.
29. Lui, W. B.; Peng, J. *Packag Technol Sci* 2003, 16, 1.
30. Peng, J.; Wei, K.; Lui, W. *Packag Technol Sci* 2005, 18, 321.
31. Pimpa, B.; Muhammad, K.; Ghazali, Z.; Hashim, K.; Hassan, M. A.; Hashim, D. M. *Carbohydr Polym* 2007, 68, 751.
32. Kiatkamjornwong, S.; Surunchanajirasakul, P.; Tasakorn, P. *Plast Rubber Compos* 2001, 30, 318.
33. Shey, J.; Imam, S. H.; Glenn, G. M.; Orts, W. J. *Ind Crops Prod* 2006, 24, 34.
34. Carvalho, A. J. F.; Job, A. E.; Alves, N.; Curvelo, A. A. S.; Gandini, A. *Carbohydr Polym* 2003, 53, 95.

35. Patil, D. R.; Fanta, G. F. *J Appl Polym Sci* 1993, 47, 1765.
36. Lutfor, M. R.; Silong, S.; Yunus, W. M. Z. W.; Rahman, M. Z. A.; Ahmad, M.; Haron, M. J. *J Appl Polym Sci* 2000, 77, 784.
37. Liu, M.; Cheng, R.; Wu, J.; Ma, C. J. *J Polym Sci Part A: Polym Chem* 2003, 31, 3181.
38. Okieimen, F. E.; Egharevba, F.; Jideonwo, A. *Acta Polym* 1990, 41, 222.
39. Trimnell, D.; Swanson, C. L.; Shogren, R. L.; Fanta, G. F. *J Appl Polym Sci* 2003, 48, 1665.
40. Kaewtatip, K.; Tanrattanakul, V. *Carbohydr Polym* 2008, 73, 647.
41. Lutfor, M. R.; Sidik, S.; Yunus, W. M. Z. W.; Rahman, M. Z. A.; Mansor, A.; Haron, M. J. *J Appl Polym Sci* 2000, 79, 1256.
42. Zhang, L.; Gao, J.; Tian, R.; Yu, J.; Wang, W. *J Appl Polym Sci* 2003, 88, 146.
43. Singh, V.; Tiwari, A.; Pandey, S.; Singh, S. K. *Starch—Stärke* 2003, 58, 536.
44. Lu, S.; Yao, K.; Lin, S.; Cao, D.; Chen, Y. *Starch—Stärke* 2003, 55, 518.
45. Lu, S.; Lin, S.; Yao, K. *Starch—Stärke* 2004, 56, 138.
46. Graaf, R. A.; Janssen, L. P. B. M. *Polym Eng Sci* 2000, 40, 2086.
47. Oliverira, P. C.; Oliverira, A. M.; Garcia, A.; Souza Barboza, J. C.; Carvalho Zavaglia, C. A.; Santos, A. M. *Eur Polym J* 2005, 41, 1883.
48. Barikani, M.; Mohammadi, M. *Carbohydr Polym* 2007, 68, 773.
49. Chi, H.; Xu, K.; Wu, X.; Chen, Q.; Xue, D.; Song, C.; Zhang W.; Wang, P. *Food Chem* 2008, 106, 923.
50. Santos, K. A. M.; Suarez, P. A. Z.; Rubim, J. C. *Polym Degrad Stab* 2005, 90, 34.
51. Chandra, R.; Rusgi, R. *Polym Degrad Stab* 1997, 56, 185.
52. Tanrattanakul, V.; Sungthong, N.; Raksa, P. *Polym Test* 2008, 27, 794.
53. Tanrattanakul, V.; Panviriyarat, W. *J Appl Polym Sci* 2009, 114, 742.

Author Proof

ภาคผนวก จ

บทคัดย่อและโปสเตอร์ในงานประชุมวิชาการ
European Polymer Congress 2009 (EPF09)

ณ ประเทศออสเตรีย

วันที่ 12-17 กรกฎาคม 2552

Cassava starch foam toughened with natural rubber latex

Wannapa Chumeka, Varaporn Tanrattanakul*

Bioplastic Research Unit, Polymer Science Program, Faculty of Science
Prince of Songkla University, Hatyai, Songkla, 90112 Thailand
email: varaporn.t@psu.ac.th

The objectives of this study are to investigate the effect of natural rubber (NR) latex content and humidity on properties of cassava starch foam. Baked starch foam was prepared at 180°C under pressure of 1,000 psi. It is found that density of foams increased from 0.1838 g/cm³ to 0.4307 g/cm³ when NR content increased from 0 to 35 pphr (parts per hundred of starch weight). Un-notched Izod impact strength of starch foam significantly increased with NR content (Table 1). At 40 %RH, samples contained NR ≥ 25 pphr became ductile fracture whereas all samples tested at 80 %RH showed ductile failure (Figure 1). Soil burial testing showed that cassava starch foam containing NR was biodegradable polymer (Figure 2).

Table 1 Impact strength of cassava starch foam

NR content (pphr)	Izod impact strength (J/m ²)	
	40 %RH	80 %RH
0	137 ± 31	261 ± 42
15	241 ± 37	347 ± 75
20	253 ± 76	385 ± 82
25	284 ± 99	447 ± 88
30	300 ± 46	699 ± 44
35	336 ± 71	729 ± 70

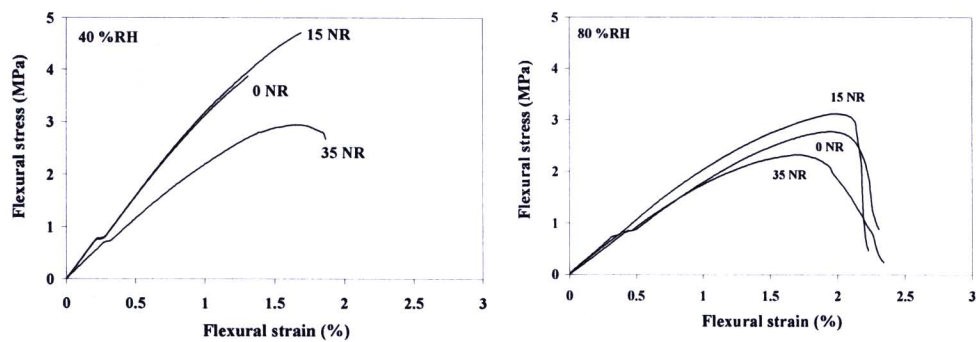


Figure 1 Flexural stress – flexural strain curves of starch foam.

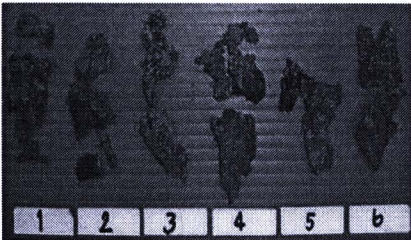
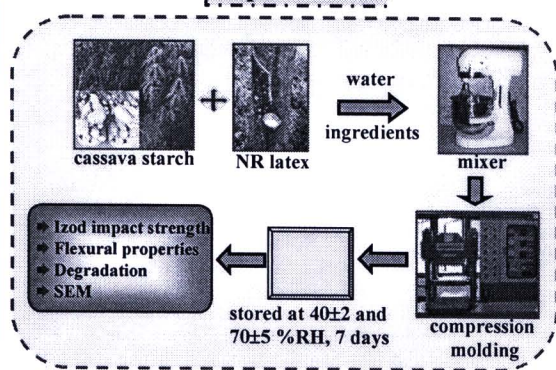


Figure 2 Cassava starch foam containing 15 pphr NR after soil burial testing for 8 weeks (6 samples), showing biodegradation.

Introduction

Starch is a natural polymer obtained from renewable resources, inexpensive and abundant. It is used as a renewable, biodegradable based material for packaging applications such as foam. Starch and water can readily be baked in a closed, heated mold. Thermoplastic starch become foam when the starch granules gelatinize and the water evaporate. Foams made from pure starch have major drawbacks on their brittleness and sensitivity to moisture and water. The objectives of this study are to investigate the effect of natural rubber (NR) latex content and humidity on properties of cassava starch foam.

Experimental



Results and discussion

Table 1. Density of cassava starch foam.

NR content (pphr)	Density (g/cm ³)	
	40% RH	70% RH
0	0.1838 ± 0.0178	0.1845 ± 0.0112
15	0.2706 ± 0.0155	0.2723 ± 0.0155
20	0.3103 ± 0.0137	0.3178 ± 0.0209
25	0.3434 ± 0.0156	0.3680 ± 0.0176
30	0.3896 ± 0.0209	0.4108 ± 0.0206
35	0.4256 ± 0.0147	0.4307 ± 0.0149

The density of foams increased from 0.1838 to 0.4307 g/cm³ when NR content increased from 0 to 35 pphr (parts per hundred of the starch weight).

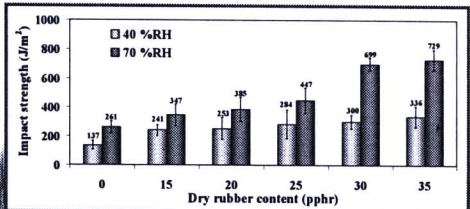


Figure 1. Effect of natural rubber content on impact strength.

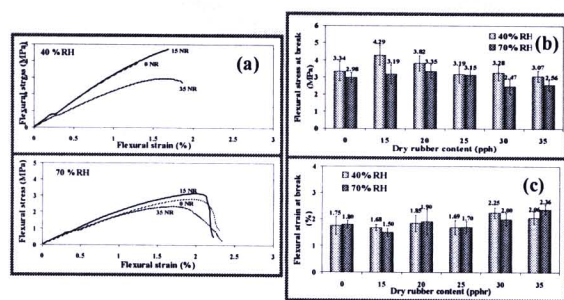


Figure 2. Flexural properties of cassava starch: (a) Stress-strain curves, (b) Strength at break, and (c) Strain at break.

Due to stress-strain curves, samples containing NR ≥ 25 pphr became ductile fracture at 40 %RH, whereas all samples tested at 70 %RH showed ductile failure.

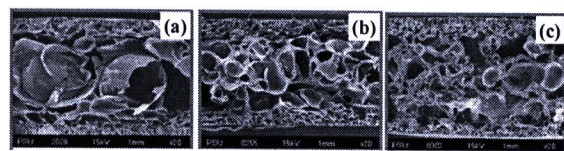


Figure 3. SEM micrographs of cassava starch foams containing different NR content: (a) 0, (b) 15, and (c) 35 pphr of NR.

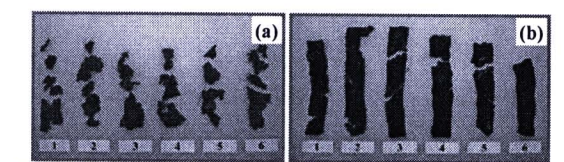


Figure 4. Specimens after soil burial testing: (a) 15 pphr of NR at the 8th week and (b) 35 pphr of NR at the 20th week.

Conclusions

Izod impact strength of cassava starch foam increased with increasing NR content. NR acted as an impact modifier for thermoplastic starch foam. The baked starch foams stored at 70 %RH provided higher impact strength than those stored at 40 %RH. In contrast, the samples stored at 70 %RH showed lower flexural strength than 40 %RH due to the foams absorbed moisture at higher relative humidity. NR did not increase strain at break of foams. Soil burial testing proved that cassava starch foam containing NR was biodegradable polymer.

Acknowledgement

This project was funded by Faculty of Science and The Graduate School, Prince of Songkla University and Thailand Research Fund.

ภาคผนวก จ

รายงานการประชุมสัมมนาทางวิชาการ (proceedings)

ณ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง

วันที่ 26-28 พฤศจิกายน 2552

อิทธิพลของปริมาณน้ำยางธรรมชาติและความชื้นสัมพัทธ์ต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยา

ของโฟมแป้งมันสำปะหลัง

EFFECT OF NATURAL RUBBER LATEX CONTENT AND RELATIVE HUMIDITY ON MECHANICAL PROPERTIES AND MORPHOLOGY OF CASSAVA STARCH FOAM

วรรณภา ชูเมฆา และ วราภรณ์ ตันรัตนกุล*

*หน่วยวิจัยพลาสติกชีวภาพ และสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่

จ.สงขลา 90112 เบอร์โทรศัพท์ 0-7428-8361

*E-mail: varaporn.t@psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมและศึกษาปริมาณของน้ำยางธรรมชาติและความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของโฟมแป้งมันสำปะหลัง ทำการอบของผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง น้ำยางธรรมชาติ และส่วนผสมอื่นๆ ในแม่แบบที่ร้อน ทำการแปรปริมาณยางธรรมชาติโดยใช้น้ำหนักแห้งตั้งแต่ 0 ถึง 35 ส่วนโดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก 100 ส่วนของแป้งมันสำปะหลัง (parts per hundred, phr) และกำหนดให้ปริมาณส่วนผสมอื่นๆคงที่ เทียบกับปริมาณของแป้ง เก็บตัวอย่างที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และ 70% เป็นเวลา 7 วัน แผ่นโฟมที่เตรียมได้มีลักษณะแข็งและมีรูพรุน โฟมแป้งมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้น การเติมยางธรรมชาติทำให้ความต้านแรงดัดโค้ง และความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นและที่ปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15 phr ทำให้ความต้านแรงดัดโค้งของโฟมมีค่าสูงสุด โฟมแป้งที่เก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงมีความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าโฟมแป้งที่เก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโฟมมีโครงสร้างต่างกันระหว่างผิวหน้าและแกนกลาง (skin core morphology) และการกระจายตัวของยางธรรมชาติที่ปริมาณยางต่ำกระจายตัวดีกว่าที่ปริมาณยางสูง

คำสำคัญ : แป้งมันสำปะหลัง โฟมกันกระแทก น้ำยางธรรมชาติ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้

Abstract

The objectives of this work are to prepare and investigate the effect of natural rubber content and relative humidity on mechanical properties and morphology of cassava starch foam. The starch foam was prepared by baking a mixture of starch, natural rubber latex and other ingredient in a hot mold. Natural rubber content was in the range of 0-35 part per hundred (phr) of starch weight. The starch foam was stored at different relative humidity (40% and 70%) for 7 days. Flexural properties and impact resistance were investigated. Foam morphology was observed by using scanning electron microscope. The obtained starch foam was rigid and porous. The density of starch foam increased with increasing natural rubber content. The flexural strength of starch foam increased with increasing the natural rubber content up to 15 phr of dry rubber content and then became decreasing. The starch foam at high relative humidity provided higher impact strength than at low relative humidity. The scanning electron micrographs of starch foam showed skin-core morphology and natural rubber at low content was good dispersed in starch matrix.

Keyword: cassava starch; foam; natural rubber latex; biodegradable polymer

บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นเรื่อยๆ มีการนำมาใช้งานหลากหลายรูปแบบ ทั้งในลักษณะของบรรจุภัณฑ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ และวัสดุต่างๆ โฟมเป็นบรรจุภัณฑ์อีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันมาก โดยทั่วไปโฟมจะผลิตจากพอลิสไตรีนหรือพลาสติกชนิดอื่นๆ แต่เมื่อนำไปกำจัดไม่สามารถย่อยสลายได้โดยง่าย ต้องใช้เวลาและทำให้สิ้นเปลืองพื้นที่มากในการฝังกลบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายให้แก่บรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมเหล่านี้ โดยการจัดหาวัสดุมาแทนบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ยากนี้ ซึ่งได้นำวัสดุที่มีมากมายในทางการเกษตรและเป็นวัสดุที่ไม่มีวันหมดนั่นคือ แป้งซึ่งหาได้ง่ายและมีราคาถูก มีการใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งทางด้านอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมกระดาษ แป้งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพสามารถย่อยสลายได้โดยธรรมชาติและใช้เวลาในการย่อยสลายสั้นกว่าพลาสติกสังเคราะห์ทั่วไป ได้มีการนำแป้งมาพัฒนาและผลิตเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ในรูปของสารตัวเติม เทอร์โทพลาสติกสตาร์ช หรือกราฟท์โคพอลิเมอร์เพื่อใช้แทนที่วัสดุปิโตรเลียมอย่างเช่นบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วทิ้ง Lacourse และ Altieri (1989) ได้ทำวิจัยโดยนำเอาแป้งมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดและการแลกเปลี่ยนสารละลายเพื่อแทนที่บรรจุภัณฑ์โฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน โฟมแป้งที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการดังกล่าวนี้มีสมบัติทางเชิงกลและสมบัติทางด้านการร้อนที่ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปโฟมให้มีรูปร่างเหมือนที่ต้องการได้ Kakinoki และ Sato (1998) ทำการอัดรีดของผสมระหว่างแป้งและน้ำยางธรรมชาติแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมด้วยวิธีการอัดเบ้าเพื่อใช้งานด้านป้องกันการสั่นสะเทือนและบรรจุภัณฑ์ Glenn และ Orts (2000) ทำการอัดรีดแป้งชนิดต่างๆและนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมด้วยวิธีการอัดเบ้า โฟมแป้งที่ได้มีสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลเทียบเท่ากับโฟมทางการค้าที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ โฟมแป้งที่ได้มีรูปร่างเหมือนแม่แบบที่ใช้และมีลักษณะเหมือนกันกับโฟมพอลิสไตรีน Zhou และคณะ (2006) ทำการอัดรีดแป้งและสารเคมีต่างๆ และนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมด้วยการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเพื่อศึกษาถึงความหนาแน่น การดูดความชื้น และสมบัติเชิงกล พบว่าโฟมที่ได้มีสมบัติต่างๆขึ้นอยู่กับสารเคมีที่เติมลงไปและสมบัติเชิงกลมีค่าใกล้เคียงกับโฟมทางการค้า Tiefenbacher และคณะ (1993) สามารถขึ้นรูปโฟมแป้งให้เป็นแผ่นบางขนาด 1.5 mm ได้ด้วยวิธีการอบ สมบัติทางความร้อนของโฟมที่ได้เทียบเท่ากับโฟมทางการค้า Anderson และ Hodson (1996) ทำการขึ้นรูปโฟมแป้งด้วยวิธีการเดียวกับการอบขนมคุกกี คือมีการผสมแป้ง น้ำ และส่วนผสมต่างๆ แล้วนำไปอบในแม่แบบที่ร้อน Shorgen และคณะ (1998) ขึ้นรูปโฟมแป้งด้วยวิธีการอบเช่นเดียวกัน แต่พบว่าสมบัติของโฟมแป้งที่ได้มีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายชนิด เช่น ชนิดของแป้ง ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง และความชื้น เป็นต้น เห็นได้ว่าโฟมแป้งที่ได้จากการอบนั้นยังคงมีข้อจำกัดในการใช้ จึงได้มีการคิดแก้ไขข้อด้อยของโฟมแป้ง โดยการนำเอาโฟมแป้งดังกล่าวผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ โดยคาดว่าพอลิเมอร์ที่เติมลงไปนั้นจะช่วยปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวของโฟมแป้งแต่ไม่ทำให้สมบัติเดิมของแป้งเปลี่ยนแปลงไป Poovarodom และคณะ (2006) ขึ้นรูปโฟมแป้งชนิดต่างๆที่มีการเติมสารเคมีและสารตัวเติมชนิดต่างๆ ด้วยวิธีการอัดเบ้าหรือฉีด ที่อุณหภูมิ 150-300°C เป็นโฟมที่สามารถใช้งานทางด้านบรรจุภัณฑ์ได้ Dinelli และคณะ (2006) ทำการเตรียมโฟมแป้งโดยการเติมเส้นใยข้าวโพดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ช่วยทำให้ค่าความทนต่อแรงดึง และความต้านทานน้ำของโฟมที่ได้ดีขึ้นตามลำดับ Preechawong และคณะ (2004 และ 2005) ทำการเตรียมโฟมแป้งผสมพอลิคาร์โปแลคโตน (PCL) และโฟมแป้งผสมพอลิแลคติกเอซิด (PLA) ขึ้นรูปด้วยวิธีการอบ นำแป้งและส่วนผสมอื่นๆอบในแม่แบบที่ร้อน พบว่าโฟมผสมทั้งสองที่ได้มีความแข็งแรงสูงสุดเมื่อเก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 42% และเวลาในการเก็บเท่ากับ 2 วัน และยังทำให้โฟมที่ได้มีความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นด้วย PCL และ PLA ช่วยทำให้ความทนต่อแรงดึงและความเครียด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น Salgado และคณะ (2008) ทำการเตรียมโฟมแป้งมันสำปะหลังที่ผสมกับโปรตีนจากคอกทานตะวัน และเส้นใย โดยการอบ โฟมผสมที่ได้มีความหนาแน่นระหว่าง 0.46 - 0.59 g/cm³ เส้นใยทำให้ความแข็งแรงของโฟมเพิ่มขึ้น โปรตีนทำให้การดูดความชื้นลดลง Shey และคณะ (2006) เตรียมโฟมแป้งโดยมีการเติมน้ำยางธรรมชาติและ

เคลือบคาร์บอน พบว่าความหนาแน่นของโฟมแข็งที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นและยางธรรมชาติยังช่วยปรับปรุงในเรื่องของความยืดหยุ่นและการดูดความชื้นของโฟมแข็งที่ได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมแข็งที่เตรียมจากการอบด้วยการเติมน้ำยางธรรมชาติและสารเติมแต่งอื่นๆ และเพื่อการศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีผลต่อสมบัติของโฟมแข็งดังกล่าว ทำการแปรปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เติมในโฟมแข็ง เพราะยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น (elastic) และความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งคาดว่าจะช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของโฟมแข็งที่ได้ดีขึ้น

วิธีการทดลอง

1. วัสดุและอุปกรณ์

แป้งมันสำปะหลังชนิดแป้งดิบผลิตโดยบริษัทเฮนเนอรัล สตาร์ช จำกัด โดยก่อนใช้ทำการอบแข็งที่ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ น้ำยางธรรมชาติชนิดแอมโมเนียมสูง ที่มีเนื้อยางแห้งเท่ากับ 60% จากบริษัทถลุงน้ำยางข้น จำกัด โซเดียมไบคาร์บอเนตใช้เป็นสารฟู ผลิตโดยบริษัทเมิร์ก จำกัด กัวร์กัมเป็นสารช่วยเพิ่มความหนืดให้แก่ส่วนผสมและทำให้โฟมแข็งที่ได้คงตัว และแมกนีเซียมสเตียเรทใช้เพื่อป้องกันการติดแม่แบบของส่วนผสม ผลิตโดยบริษัทชิมา จำกัด กลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ผลิตโดยบริษัทเอแจ๊ค จำกัด

ผสมแข็งและส่วนผสมต่างๆด้วยเครื่องผสมรุ่น KM 262 ผลิตโดยบริษัท เคนวูด จำกัด แม่แบบที่ใช้ในการขึ้นรูปมีขนาด 150 mm × 150 mm × 4 mm และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง ผลิตโดยบริษัท Instron instrument รุ่น 5569 เครื่องทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ผลิตโดยบริษัท ZWICK กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-5800LV และเดสซิเคเตอร์ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ใช้ในการเก็บตัวอย่าง

2. การเตรียมตัวอย่าง

ทำการผสมแป้ง โซเดียมไบคาร์บอเนต กัวร์กัม และแมกนีเซียมสเตียเรท ในเครื่องผสม โดยทำการผสมกันแบบแห้ง (dry mixing) ก่อนที่จะเติมกลีเซอรอลและน้ำ กวนผสมให้เข้ากันจนกระทั่งของผสมทั้งหมดกลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมน้ำยางธรรมชาติลงไป กวนผสมให้ของผสมทั้งหมดกลายเป็นเนื้อเดียวกัน นำส่วนผสมที่ได้ไปชั่งน้ำหนักตามที่ต้องการ เทลงไปในแม่แบบที่ร้อน นำแม่แบบไปอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 180°C เป็นเวลา 5 min ใช้ความดันในการอบเท่ากับ 1000 psi นำแม่แบบออกวางที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 min แล้วแกะโฟมออกจากแม่แบบ โฟมที่ได้ถูกเก็บไว้ในเดสซิเคเตอร์ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ $40 \pm 2\%$ และวางไว้ภายนอกเดสซิเคเตอร์ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศห้องประมาณ $70 \pm 5\%$ อุณหภูมิในห้องมีค่าประมาณ $29 \pm 1^\circ\text{C}$ เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการทดสอบสมบัติเชิงกล

3. การทดสอบสมบัติเชิงกลและการตรวจสอบฐานวิทยา

3.1. การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.1.1. การทดสอบความหนาแน่น (Density)

ทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาด 15 × mm 15 mm × 4 mm เพื่อใช้คำนวณหาปริมาตรของตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างด้วยเครื่องชั่ง ที่มีความละเอียด 0.0001 g คำนวณความหนาแน่นโดยนำเอาน้ำหนักหารด้วยปริมาตรที่หาได้ (g/cm^3) ทำการทดสอบ 10 ชิ้นต่อตัวอย่าง รายงานค่าเฉลี่ย

3.1.2. การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 790 ระยะวางตัวอย่าง (support span) เท่ากับ 80 mm และความเร็วในการทดสอบ 2.5 mm/min รายงานค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ความต้านแรงดัดโค้ง (flexural strength, MPa) และความเครียดแรงดัดโค้งสูงสุด (maximum flexural strain, %) ทำการทดสอบ 10 ซินต่อตัวอย่าง รายงานค่าเฉลี่ย

3.1.3. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อกระแทก (Impact resistance)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบไอซอด ซินทดสอบมีขนาด 4 mm × 12.7 mm × 63.5 mm ไม่บากซินทดสอบ ใช้ลูกตุ้ม (Pendulum) ที่มีขนาด 2 J รายงานค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact Strength, J/m²) ทำการทดสอบ 10 ซินต่อตัวอย่าง รายงานค่าเฉลี่ย

3.2. การตรวจสอบพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบพื้นฐานวิทยาของโฟมแป้งที่ได้ เป็นการตรวจสอบเพื่อศึกษาถึงลักษณะของโฟมแป้ง และความเข้ากันได้ของน้ำยางธรรมชาติที่เติมลงไป ในโฟมแป้ง เตรียมชิ้นงานโดยนำเอาชิ้นงานที่มีผิวหน้าที่เกิดจากการหัก (fractured surface) ที่ผ่านการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งมาตัดแล้วนำมาติดบนแท่งอะลูมิเนียม เคลือบด้วยทอง และนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

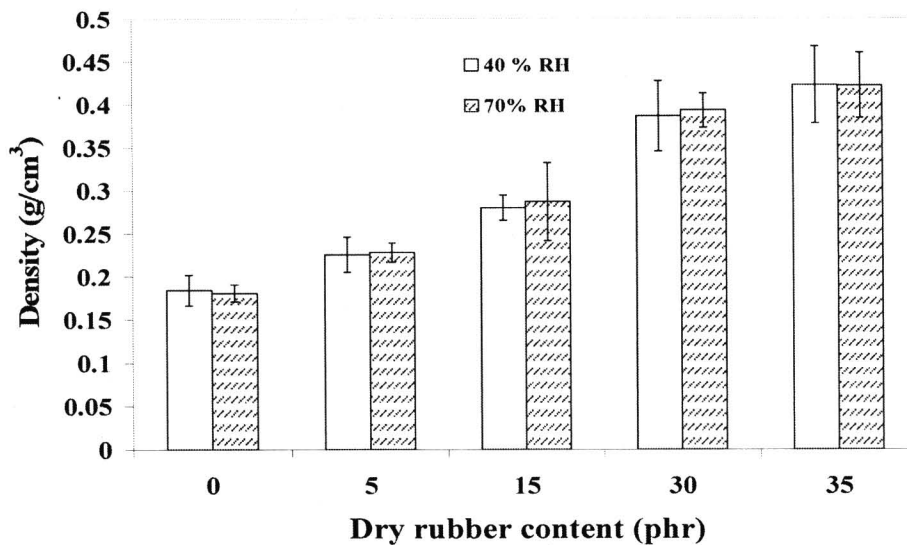
3.3. การวิเคราะห์ทางสถิติ (statistic analysis)

การวิเคราะห์ทางสถิติของผลการทดลองที่ได้ เพื่อหาความแตกต่างทางสถิติของสมบัติเชิงกลโดยใช้ LSD (Least Significant Difference) ด้วยโปรแกรม One-Way ANOVA

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1. ผลของความหนาแน่น

จากการศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อความหนาแน่นของโฟมแป้ง พบว่าความหนาแน่นของโฟมแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1 ความหนาแน่นของโฟมที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.18-0.42 g/cm³ ความหนาแน่นของโฟมแป้งผสมน้ำยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเนื้อยางแห้งที่เติมลงไป ซึ่งเป็นเพราะยางธรรมชาติที่เติมลงไปนั้นไม่เกิดเป็นโฟม (Shey และคณะ (2006)) ในการวิจัยครั้งนี้พบว่าความหนาแน่นของโฟมแป้งที่ได้มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของโฟมพอลิสไตรีนและเปเปอร์บอร์ดที่มีค่าเท่ากับ 0.07 และ 0.21 g/cm³ ตามลำดับ (Shey และคณะ (2006) และ Glenn และคณะ (2001)) และโฟมแป้งที่ผลิตจากแป้งชนิดต่าง ๆ คือ แป้งข้าวสาลี แป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลัง จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.07-0.41 g/cm³ ค่าความหนาแน่นของแผ่นโฟมแป้งที่ทำการเติมเส้นใยและแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.63-1.3 g/cm³ (Salgado และคณะ (2008)) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าเมื่อเติมเส้นใยและแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปทำให้ความหนาแน่นของโฟมแป้งที่ได้เพิ่มขึ้น (Glenn และคณะ (2001)) ส่วนอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าความหนาแน่นของโฟมแป้งที่ได้แตกต่างกันน้อยมากเมื่อทำการเก็บตัวอย่างภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 40% และ 70% ตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 70% ให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากตัวอย่างมีการดูดความชื้นจึงทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และเพราะความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละช่วงของแต่ละวันไม่เท่ากันจึงทำให้การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของโฟมที่ได้ไม่เท่ากัน



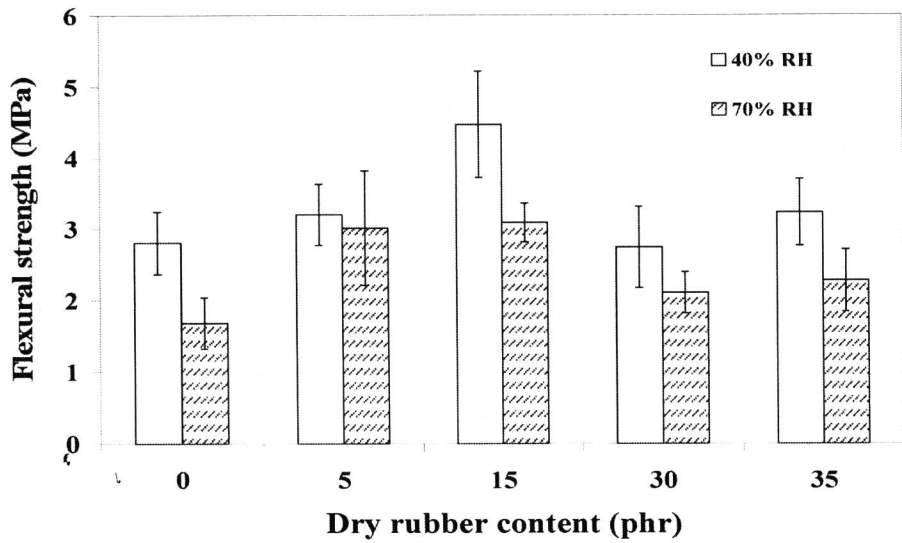
รูปที่ 1 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อความหนาแน่นของโฟมแข็ง

4.2 สมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง

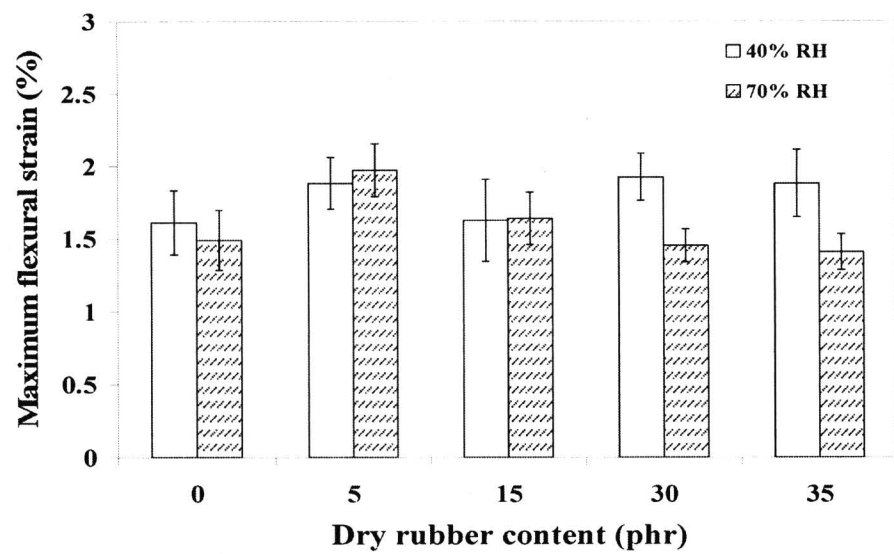
ผลของปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้งของโฟมแข็ง แสดงในรูปที่ 2 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40% เมื่อปริมาณยางธรรมชาติสูงขึ้นทำให้ความต้านแรงดัดโค้งสูงขึ้นจนกระทั่งปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15 phr จะให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2 (a) แต่เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเท่ากับ 30 และ 35 phr ทำให้ความต้านแรงดัดโค้งลดลงและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตามลำดับ ส่วนความเครียดแรงดัดโค้ง พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นค่าความเครียดแรงดัดโค้งมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงได้ว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 (b) เป็นเพราะว่ายางธรรมชาติที่เติมลงไปนั้นไม่ได้มีการวัลคาไนซ์โฟมจึงค่อยๆ ฉีกขาดและฉีกขาดได้ง่าย ไม่ได้ช่วยในเรื่องของความสามารถในการยึดของโฟมแข็ง ส่วนที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% พบว่าความต้านแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 5 และ 15 phr แต่เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 35 phr ความต้านแรงดัดโค้งกลับลดลงและคงที่ และความเครียดแรงดัดโค้งของโฟมที่ได้ พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นเป็น 5 phr ทำให้ค่าความเครียดแรงดัดโค้งที่ได้มีค่าสูงสุดและที่สัดส่วนปริมาณยางอื่นๆ มีค่าความเครียดแรงดัดโค้งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

อิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อโฟมแข็ง พบว่าเมื่อทำการเก็บตัวอย่างภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40% จะให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ส่วนผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่างกันต่อความเครียดแรงดัดโค้ง พบว่าที่ 0, 5 และ 15 phr ค่าความเครียดแรงดัดโค้งแตกต่างกันเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ความเครียดแรงดัดโค้งที่ปริมาณยางธรรมชาติ 30 และ 35 phr มีความแตกต่างกันค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณยางธรรมชาติที่สูงทำให้การกระจายตัวเกิดได้ไม่ดีจึงทำให้ความเครียดแรงดัดโค้งลดลง ความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อโฟมแข็งที่สามารถสังเกตได้ คือการหักของชิ้นตัวอย่างขณะทำการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดัดโค้ง ตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40% เมื่อทดสอบชิ้นตัวอย่างจะหักแบบเปราะพบในสัดส่วนของปริมาณยางธรรมชาติที่น้อย (0-15 phr) แต่ตรงกันข้าม ตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ทุกสัดส่วนของปริมาณยางธรรมชาติ เมื่อทดสอบพบว่าตัวอย่างค่อยๆ ฉีกออกจากกัน ซึ่งคาดว่าเป็นผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อชิ้นตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่าความชื้นจะมีผลต่อโฟมแข็งค่อนข้างมากกล่าวคือ ที่ความชื้นสูง โฟมแข็งจะมีความสามารถในการยืดสูงเพราะเกิดการดูด

ซับความชื้นจึงส่งผลให้มีความแข็งแรงต่ำ แต่ในทางตรงกันข้ามที่ความชื้นต่ำ โฟมแข็งที่ได้จะเปราะ (Shrogren และคณะ (1998))



(a)



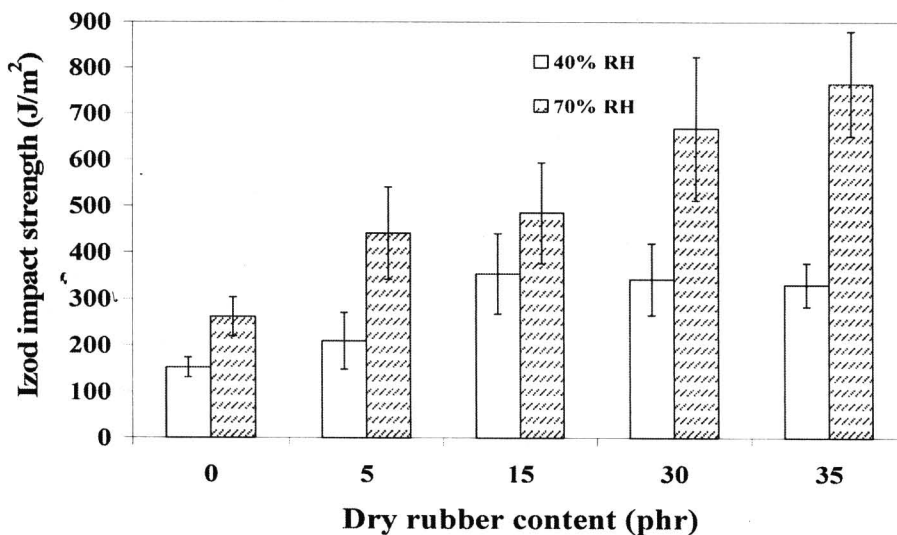
(b)

รูปที่ 2 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อ (a) ความต้านแรงดัดโค้งและ (b) ความเครียดแรงดัดโค้งของโฟมแข็ง

4.3 ความต้านทานต่อแรงกระแทก

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมแข็งที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40% พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15 phr และจะคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณยางธรรมชาติเป็น 30 และ 35 phr แสดงในรูปที่ 3 และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% พบว่าเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นและเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 35 phr

ส่วนผลของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อโพลีเมอร์พบว่าเมื่อทำการเก็บตัวอย่างภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 40% จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 70% ซึ่งตัวอย่างที่มีการเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงจะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงกว่าตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำอย่างเห็นได้ชัดเจน เป็นผลจากตัวอย่างที่เก็บภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์สูงมีการดูดซับความชื้นจากสภาพแวดล้อม ความชื้นที่ดูดซับนั้นทำให้โพลีเมอร์มีความเหนียวเพิ่มขึ้นจึงดูดกลืนพลังงานได้สูง และเนื่องจากยางธรรมชาติ (flexible polymer) ดูดกลืนพลังงานได้ดีกว่าแข็ง (rigid polymer) จึงส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกของโพลีเมอร์ผสมน้ำยางธรรมชาติที่ได้เพิ่มขึ้น

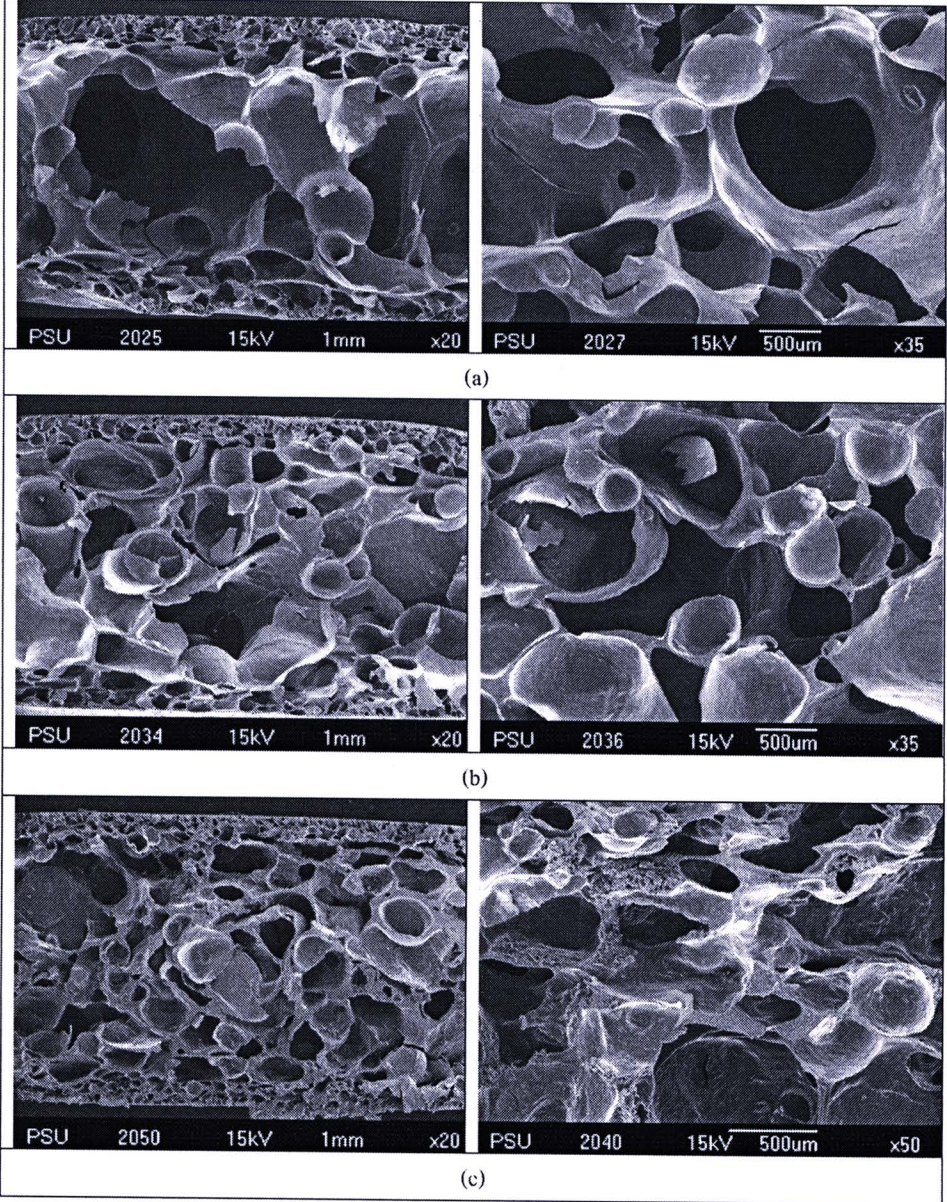


รูปที่ 3 อิทธิพลของปริมาณยางธรรมชาติต่อความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอดของโพลีเมอร์

4.4 ลักษณะฐานวิทยาศาสตร์

จากลักษณะฐานวิทยาศาสตร์ของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมน้ำยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4 (a), (b) และ (c) จากภาพถ่ายสามารถบอกได้ว่าเมื่อโพลีเมอร์ได้รับความร้อนเมื่อเป่าจะเกิดการแตกตัวแล้วกลายเป็นเจลและน้ำจะเหวี่ยงออกไปเกิดเป็นรูพรุน ทั้งโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมน้ำยางธรรมชาติมีลักษณะเหมือนกันคือมีโครงสร้างต่างกันระหว่างผิวหน้าและแกนกลาง หรือที่เรียกว่า skin-core morphology ผิวด้านนอก (ด้านบนและด้านล่าง) มีรูพรุนขนาดเล็ก และมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด และส่วนแกนกลาง (ระหว่างผิวทั้งสองด้าน) มีรูพรุนขนาดใหญ่ ผนังเซลล์บาง และโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด เนื่องจากผนังเซลล์ทั้งด้านบนและด้านล่างของโพลีเมอร์มีการสัมผัสกับแม่แบบทำให้เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดเป็นเจลและแห้งเร็วจึงทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กกว่าและผนังเซลล์บางกว่าแกนกลางของโพลีเมอร์ (Shogren และคณะ (2002) Preechawong และคณะ (2005) และ Cinelli และคณะ (2006)) น้ำยางธรรมชาติทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กส่งผลให้ความหนาแน่นของโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติที่เติมลงไปทำให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นและน้ำยางธรรมชาติจะเข้าไปแทรกในโพลีเมอร์ระหว่างการอบและการเกิดโพลีเมอร์ (Cinelli และคณะ (2006)) ภาพถ่ายของโพลีเมอร์ผสมยางธรรมชาติปริมาณ 15 phr ดังรูปที่ 4 (b) พบว่ายางธรรมชาติมีการกระจายตัวในเนื้อโพลีเมอร์และยางยึดเกาะกับเนื้อโพลีเมอร์ได้ดีไม่มีการแยกเฟส จึงทำให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น และรูปที่ 4 (c) โพลีเมอร์ผสมยางธรรมชาติปริมาณ 30 phr พบว่าผนังเซลล์จะมีความหนาแน่นกว่าของโพลีเมอร์และโพลีเมอร์ผสมยางธรรมชาติที่ปริมาณยางน้อย สังเกตเห็นอย่างบางส่วนกระจายตัวได้ไม่ดีและเกาะกลุ่มกันพบในบริเวณแกนกลางของโพลีเมอร์ เมื่อใช้กำลังขยายสูงสังเกตเห็นเฉพาะส่วนที่เป็นยาง

เพราะปริมาณยางที่มากเกินไปทำให้เกิดการแยกเฟส จึงทำให้ความต้านแรงดัดโค้งของโฟมที่ได้ลดลง และยางธรรมชาติเป็นวัสดุเพิ่มความเหนียวซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานได้ดีจึงส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกของโฟมเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) โฟมเปล่า (b) โฟมแป้งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 15 phr และ (c) โฟมแป้งผสมยางธรรมชาติปริมาณ 30 phr

5. สรุปผลการทดลอง

โฟมแป้งผสมน้ำยางธรรมชาติที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธีการอบในแม่แบบที่ร้อน เดมน้ำยางธรรมชาติลงไปเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของโฟมแป้ง พบว่าสมบัติเชิงกลของโฟมแป้งผสมน้ำยางธรรมชาติได้แก่ ความต้านแรงดัดโค้งและความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบไอซอดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และความต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับ 15 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40 % และอิทธิพลของความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าที่

ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 40% ทำให้โฟมแข็งที่ได้มีความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 70% แต่สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70% สูงกว่าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 40% จากการศึกษาถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าโฟมแข็งและโฟมแข็งผสมน้ำยางธรรมชาติมีโครงสร้างต่างกันระหว่างผิวหน้าและแกนกลาง (skin-core morphology) และยางธรรมชาติมีการกระจายตัวในโฟมแข็ง ที่ยางธรรมชาติเท่ากับ 15 phr กระจายตัวดีและมีการยึดเกาะกันดีระหว่างแข็งและยางจึงทำให้ความต้านแรงดัดโค้งและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และบริษัทเนนรัลสตาร์ชจำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แป้งมันสำปะหลัง

เอกสารอ้างอิง

- Andersen, P.J. & Hodson, S.K. (1996). Molded articles having an inorganically filled organic polymer matrix. US Patent No. 5,545,450.
- Cinelli, P., Chiellini, E., Lawton, J. W., & Iman, S. H. (2006). Foamed articles based on potato starch, corn fibers and poly(vinyl alcohol). *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1147–1155.
- Glenn, G.M., & Orts, W.J. (2000). Properties of starch-based foam formed by compression/explosion processing. *Industrial Crops and Products*, 13, 135–143.
- Glenn, G.M., Orts, W.J., Nobes, G.A.R., & Gray, G.M. (2001). In situ laminating process for baked starch-based foams. *Industrial Crops and Products*, 14, 125–134.
- Glenn, G.M., Orts, W.J., & Nobes, G.A.R. (2001). Starch, fiber and CaCO_3 effects on the physical properties of foams made by a baking process. *Industrial Crops and Products*, 14, 201–212.
- Kakinoki, H. & Sato, H. (1998). Foam-expanded material. US Patent No. 5,766,749.
- Katepeth, C., Rujiravanit, R., & Magaraphan, R. (2006). Effect of natural rubber content on morphology and mechanical properties of starch-based foam. *Proceeding of the 32nd Congress on Science and Technology of Thailand (STT.32)*. 10 - 12 October 2006. Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand.
- Lacourse, N.L. & Altieri, P.A., (1989). Biodegradable packaging material and the method of preparation thereof. US Patent No. 4,863,655.
- Poovarodom, N., & Praditdoug, S. (2006). Non-Synthetic biodegradable starch-based composition for production of shaped bodied. US patent No. 07,067,651.
- Preechawong, D., Peesan, M., Supaphol, P., & Rujiravanit, R. (2004). Characterization of starch/poly(ϵ -caprolactone) hybrid foams. *Polymer Testing*, 23, 651–657.
- Preechawong, D., Peesan, M., Supaphol, P., & Rujiravanit, R. (2005). Preparation and characterization of starch/poly(L-lactic acid) hybrid foams. *Carbohydrate Polymers*, 59, 329–337.
- Shogren, R.L., & Lawton, J.W. (1998). Enhanced water resistance of starch-based materials. US Patent No. 5,756,194.
- Shogren, R.L., Lawton, J.W., Doane, W. M., & Tiefenbacher, K.F. (1998). Structure and morphology of baked starch foams. *Polymer*, 39, 6649–6655.

- Shogren, R.L., Lawton, J.W., & Tiefenbacher, K.F. (2002). Baked starch foams: starch modifications and additives improve process parameters, structure and properties. *Industrial Crops and Products*, 16, 69–79.
- Soykeabkaew, N., Supaphol, P., & Rujiravanit, R. (2004). Preparation and characterization of jute- and flax-reinforced starch-based composite foams. *Carbohydrate Polymers*, 58, 53–63.
- Shey, J., Imam, S.H., Glenn, G.M., & Orts W.J. (2006). Properties of baked starch foam with natural rubber latex. *Industrial Crops and Products*, 24, 34-40.
- Salgado, P.R., Schmidt, V.C., Molina Ortiz, S.E., Mauri, A.N. & Laurindo, J. B. (2008). Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. *Journal of Food Engineering*, 85, 435-443.
- Zhou, J., Song, J., & Parker, R. (2006). Structure and properties of starch-based foams prepared by microwave heating from extruded pellets. *Carbohydrate Polymers*, 63, 466-475.

ภาคผนวก ข

การปรับปรุงแก้ไขรายงานตามข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

ภาคผนวก ข

การปรับปรุงแก้ไขรายงานตามข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ปรับปรุงแก้ไขชื่อโครงการวิจัยที่หน้าปกรายงานให้ตรงกับสัญญา
2. แก้ไขคำผิดตามข้อเสนอแนะทั้งหมด
 - 2.1 หน้า 2 สรุปผลการวิจัย บรรทัดที่ 3 เปลี่ยนคำว่า “ปละ” เป็นคำว่า “และ”
 - 2.2 หน้า 7 แก้ไขทุกคำที่เสนอแนะยกเว้นคำว่า liter ไม่สามารถแก้ไขเป็น leter ตามที่ผู้ทรงคุณวุฒิแนะนำได้ เพราะคำสะกดที่ถูกต้องคือ liter
3. ข้อ 2.5 การเก็บตัวอย่าง
 - 3.1 ภายในโถดูดความชื้นที่บรรจุซิลิกาเจลจะมีเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอลวางอยู่ใน มีการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโถดูดความชื้นทุกวัน วันละ 4 เวลา แสดงข้อมูลในภาคผนวก ค การรายงานใช้ค่าเฉลี่ย
 - 3.2 มีการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอล ที่วางอยู่ในห้องปฏิบัติการ (ภายนอกโถดูดความชื้น) แสดงข้อมูลในภาคผนวก ค การรายงานใช้ค่าเฉลี่ย
4. ข้อ 2.11 ดินที่นำมาฝังตัวอย่างไม่มีการควบคุมหรือตรวจสอบ ใช้ดินตามธรรมชาติ นำมาจากสวนยางพารา เพื่อให้คล้ายคลึงกับการฝังกลบขยะทั่วไป
5. การใช้หน่วย pph เป็นการกำหนดของคณะนักวิจัย ซึ่งย่อมาจาก parts per hundred หมายถึงส่วนในร้อยส่วน เช่น การเติมกลีเซอรอล 5 ส่วนโดยน้ำหนักตามปริมาณแบ่งหนัก 100 ส่วน ถ้าในการผสมใช้แป้ง 200 กรัม จะใช้กลีเซอรอล 10 กรัม ถ้าใช้แป้ง 50 กรัม ใช้กลีเซอรอล 2.5 กรัม สูตรผสมในรายงานนี้มีการใช้หน่วยส่วนผสมทั้งในรูป pph และ % ถ้าเป็นเปอร์เซ็นต์หมายความว่าน้ำหนักรวมกันแล้วเป็น 100 ดังนั้น การใช้หน่วย pph จึงไม่มีความผิดพลาดตามข้อคิดเห็นของท่านผู้ทรงคุณวุฒิ
6. ได้ปรับปรุงการเขียนตามที่ท่านผู้ทรงคุณวุฒิเสนอ มีการเพิ่มเติมบทนำ (บทที่ 1) และบทที่ 2 ทฤษฎีและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวน 28 หน้า



