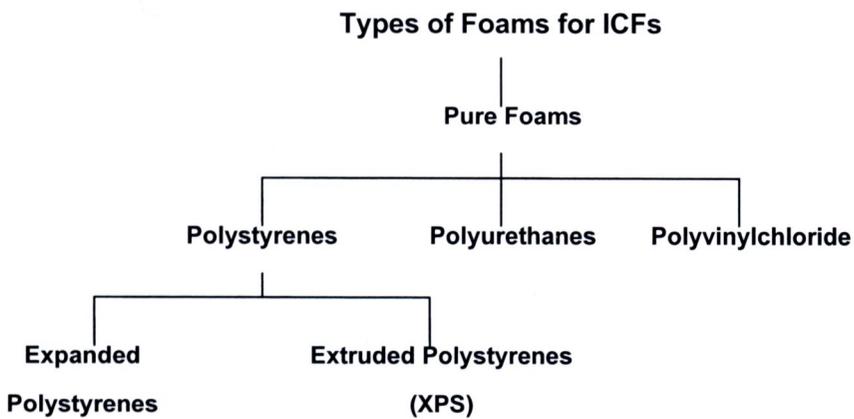


### บทที่ 3

## ชนิดและคุณสมบัติของโพน้ำที่ใช้ผลิต ICF

โพน้ำ (Rigid foam) ที่สามารถนำมาใช้ในการผลิต ICF แบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ ได้แก่

- 1) โพน้ำโพลีสไตรีน (Polystyrene Foam – โพน้ำ PS) แบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น
  - โพน้ำ EPS (Expanded Polystyrene Foam)
  - โพน้ำ XPS (Extruded Polystyrene Foam)
- 2) โพน้ำโพลียูรีเทนแบบแข็ง (Rigid Polyurethane Foam – โพน้ำ PU)
- 3) โพน้ำพีวีซีแบบแข็ง (Rigid Polyvinylchloride Foam – โพน้ำ PVC)



รูปที่ 3.1 ชนิดของโพน้ำที่ใช้ในการผลิต ICF

จากการศึกษาผลิตภัณฑ์ ICF ของต่างประเทศ พบว่า นิยมผลิตด้วยโพน้ำ EPS หรือ XPS และ PU ส่วนโพน้ำ PVC จะใช้ในการผลิตวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น เช่น บันลุม ลวดบัว ตกแต่ง และใช้แทนไม้เทียม ฯลฯ

#### 1. โพน้ำ EPS (Expanded Polystyrene Foam)

โพน้ำ EPS หรือโพน้ำแผ่นสีขาว เป็นโพน้ำที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ แผ่นฉนวนกันความร้อน แผ่นกันกระแทกชั้นในหมวกกันน็อค เป็นต้น

โพน้ำ EPS ทำมาจากเม็ดพลาสติกโพลีสไตรีน ซึ่งเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว ลักษณะการเรียงตัวของพอลิเมอร์เป็นแบบเส้นยาวตลอด (Linear shape) มีกระบวนการผลิตโพน้ำโดยใช้ก๊าซเพนเทน (Pentane) เป็นสารทำให้ฟู (Blowing agent) หรือผสมสารเคมีทำให้

เกิดก๊าซ (Volatile liquid) เข้าไปในเนื้อวัสดุพลาสติกขณะทำการผลิต เมื่อนำวัสดุนี้ไปผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อน ก๊าซซึ่งอยู่ภายในจะขยายตัวทำให้เนื้อพลาสติกพองขึ้นเป็นโฟม โฟม EPS ที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างจะต้องเติมสารหน่วงไฟ (Fire retardant) ในระหว่างกระบวนการผลิตโฟมด้วย [1]

### 1.1 ปฏิกริยาต่อไฟ

โฟม EPS เป็นเทอร์โมพลาสติกจึงสามารถละลายได้ถ้าถูกไฟหรือความร้อน เมื่อโฟม EPS สัมผัสกับอากาศที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส นานต่อเนื่องกัน โฟม EPS จะอ่อนตัวและหดตัว จนในที่สุดจะละลาย และหากสัมผัสกับความร้อนต่อไปอีกก็สามารถลุกไหม้และเกิดก๊าซได้ โฟม EPS ที่ละลายแล้วนี้จะเสียคุณสมบัติเดิมไป การเกิดการลุกไหม้ขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิระยะเวลาที่สัมผัสกับความร้อนโดยตรง และการไหลเวียนของอากาศรอบๆ วัสดุนั้น (ปริมาณออกซิเจนที่มี)

โฟม EPS ที่เติมสารหน่วงไฟ (Fire retardant) คือ การเติม Cycloaliphatic Organobromine หรือเรียกอีกอย่างว่า Hexabromocyclododecan (HBCD) ลงไปเล็กน้อย เมื่อสัมผัสกับไฟ สารหน่วงไฟจะทำให้โฟมเกิดการชุ่มตัว (Quenching) ทำให้โฟมอดและไม่ลามไปส่วนอื่น

จากการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM D 1929 พบว่าเมื่อมีเปลวไฟเป็นองค์ประกอบ อุณหภูมิที่ทำให้โฟม EPS เกรด N สามารถลุกติดไฟได้คือ 360 องศาเซลเซียส และเกรด F ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายความว่า เมื่อโฟมละลายแล้วมันจะเริ่มปล่อยก๊าซที่ติดไฟได้ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่าเท่านั้น และถ้าไม่มีเปลวไฟเป็นองค์ประกอบ โฟม EPS ที่ละลายแล้วจะติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส กรณีที่มีวัสดุติดไฟหรือสารเคมีที่เป็นเชื้อเพลิงขนาดใหญ่กว่า 50 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร กำลังไหม้อยู่ใกล้ๆ ด้วยโฟม EPS จะไหม้และเหลือสภาพเดิมของ Polystyrene ไว้ก่อนที่จะมีการเติมสารเคมี โฟม EPS ที่กำลังไหม้จะปล่อยความร้อนออกมา 40 เมกกะจูลส์ต่อกิโลกรัม (โดยน้ำหนัก) หรือ 400-2,000 เมกกะจูลส์ต่อลูกบาศก์เมตร (โดยปริมาตร) คิวบิกที่เกิดจากการเผาไหม้โฟม EPS จะเป็นสีดำ

ตารางที่ 3.1 ความเป็นพิษของควันไฟจากโพลีเอสเตอร์ EPS เปรียบเทียบกับวัสดุธรรมชาติอื่นๆ [2]

| The toxicity of smoke fumes from EPS in various 'natural' materials.      |  |           |         |         |         |
|---|--|-----------|---------|---------|---------|
| Sample  | Emitted fractions (v/v) in ppm at different temperatures |           |         |         |         |
|   | Smoke gasses in a Fire                                   | 300 C     | 400 C   | 500 C   | 600 C   |
| EPS<br>(standard grade)   | Carbon monoxide  | 50*       | 200*    | 400*    | 1,000*  |
|   | Monostyrene  | 200       | 300     | 500     | 50      |
|   | Other aromatic compounds                                 | fractions | 10      | 30      | 10      |
|   | Hydrogen bromide   | 0         | 0       | 0       | 0       |
| EPS-SE<br>(fire retardant<br>grade)                                       | Carbon monoxide  | 10*       | 50*     | 500*    | 1,000*  |
|   | Monostyrene  | 50        | 100     | 500     | 50      |
|   | Other aromatic compounds                                 | fractions | 20      | 20      | 10      |
|   | Hydrogen bromide   | 10        | 15      | 13      | 11      |
| Deal  | Carbon monoxide  | 400*      | 6,000*  | 12,000* | 15,000* |
|   | Aromatic compounds                                       | --        | --      | --      | 300     |
| Chip board  | Carbon monoxide  | 14,000*   | 24,000* | 59,000* | 69,000* |
|   | Aromatic compounds                                       | fractions | 300     | 300     | 1,000   |
| Expanded cork   | Carbon monoxide  | 1,000*    | 3,000*  | 15,000* | 29,000* |
|   | Aromatic compounds                                       | fractions | 200     | 1,000   | 1,000   |
| Smouldering/glowing      ** as a flame      -- not detected               |  |           |         |         |         |
| Remarks: Test conditions specified in DIN 53 436; air flow rate 100 l/h;  |  |           |         |         |         |
| 300 mm x 15 mm 20 mm test specimens compared at normal end-use conditions |  |           |         |         |         |

จากตารางจะเห็นว่าควันไฟจากโพลีเอสเตอร์ EPS มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และโมโนสไตรีนค่อนข้างมาก แต่ยังมีปริมาณต่ำกว่า ไม้อัด และไม้คอร์ก มาก ที่ระดับอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส โพลีเอสเตอร์ EPS เกรด F จะมีปริมาณก๊าซดังกล่าวที่ปล่อยออกมาต่ำกว่าโพลีเอสเตอร์ธรรมดา ประมาณ 4 เท่า ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเป็นอันตรายถ้าสูดดมเข้าไปในปริมาณ 10,000-15,000 ppm เป็นเวลา 1-3 นาที ส่วนสไตรีนนั้นสามารถได้กลิ่นได้เมื่อมีปริมาณเพียง 25-50 ppm แต่จะเริ่มเป็นอันตรายเมื่อสูดดมเข้าไปในปริมาณ 200-400 ppm ถ้าสัมผัสกับสไตรีนในปริมาณ 600 ppm อาจจะทำให้แสบตาและอาเจียน เมื่อได้รับในปริมาณ 800 ppm อาจทำให้ระบบประสาทเสียหาย ในกรณีที่ไหม้ไฟสไตรีนมักจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

## 1.2 การปล่อยสารพิษขณะใช้งาน

ความหมายของ “สารพิษ” ตาม The Guidance Paper ของ the Construction Products Directive (CPD) คือ

“สสารและองค์ประกอบทางเคมีของมันซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ หรือได้จากกระบวนการผลิต จะถูกพิจารณาว่าเป็นอันตรายเมื่อพบว่า สสารนั้นเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ กรณีที่ผู้ใช้ใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นๆ ตามปกติ หรือใช้งานตามกระบวนการก่อสร้างปกติ โดยประเด็นที่ต้องคำนึงถึงเมื่อเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ในงานก่อสร้าง ได้แก่ การปล่อยหรือการแผ่รังสีของสารพิษสู่อากาศ น้ำดื่ม และดิน”

โพลีเอทิลีน (EPS) ไม่มีการปล่อยสารพิษในระหว่างการใช้งานเกินปริมาณที่อ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป จึงมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร

### 1.3 การรีไซเคิล

เนื่องจากโพลีเอทิลีน (EPS) เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) จึงมีศักยภาพที่จะนำกลับมารีไซเคิลได้ โดยโพลีเอทิลีน (EPS) ที่จะนำมารีไซเคิลต้องทำการแยกออกจากวัสดุหรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ก่อน กระบวนการรีไซเคิลโพลีเอทิลีน (EPS) เริ่มต้นด้วยการบดเศษโพลีเอทิลีนให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อนำเศษโพลีเอทิลีนกลับมาใช้ใหม่ ยกตัวอย่างเช่น

1) นำเศษโพลีเอทิลีนไปผสมกับเม็ดโพลีเอทิลีน (EPS) ใหม่ แล้วนำไปผลิตเป็นโพลีเอทิลีน (EPS) ซ้ำได้อีก หรือนำไปผสมดินใส่กระถางต้นไม้ ใส่อินเพื่อทำให้ร่วนและระบายน้ำได้ดี

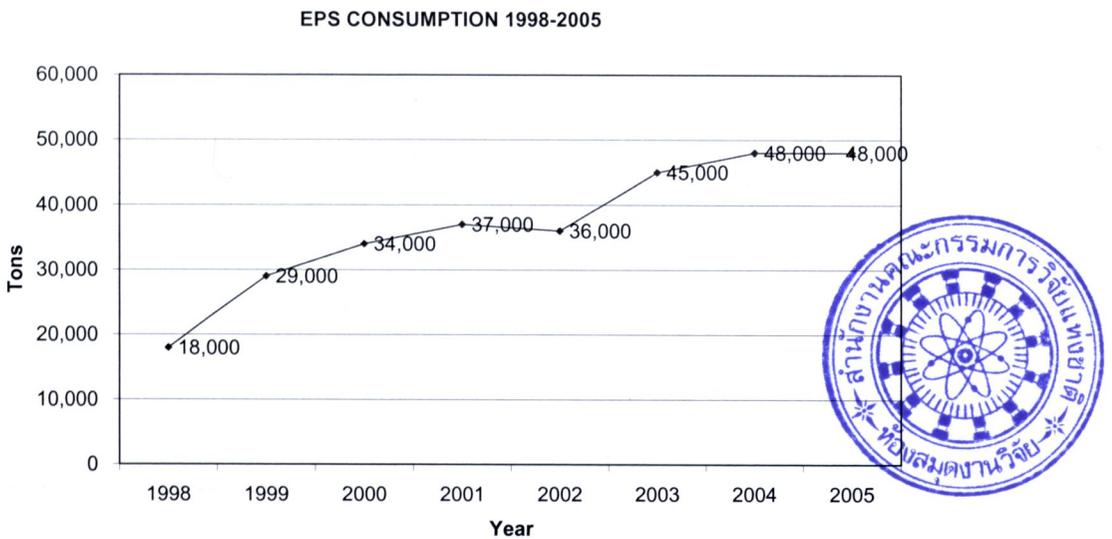
2) นำเศษโพลีเอทิลีนไปบดให้ละเอียดขึ้นแล้วนำไปเป็นส่วนผสมของอิฐหรือคอนกรีตเพื่อลดน้ำหนักอาคารและเพิ่มความเป็นฉนวนให้กับผนังอาคาร

3) นำไปหลอมโดยใช้สกรูความร้อน (Screw extrusion) ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว แล้วนำกลับไปสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง เช่น ผลิต Compact Polystyrene เป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น กระถางต้นไม้ ไม้แขวนเสื้อ หรือผลิตภัณฑ์ทดแทนไม้อื่นๆ หรือผลิตเป็น Medium toughened polystyrene สำหรับการผลิตแผ่นโพลีเอทิลีนบาง ถาดโพลีเอทิลีน เศษเหลือทิ้งจากโพลีเอทิลีนเมื่อนำไปผสมกับพลาสติกอื่นๆ อาจสามารถนำไปผลิตเป็นแก้อีสานาม เสารั่ว ป้ายถนน ได้อีก

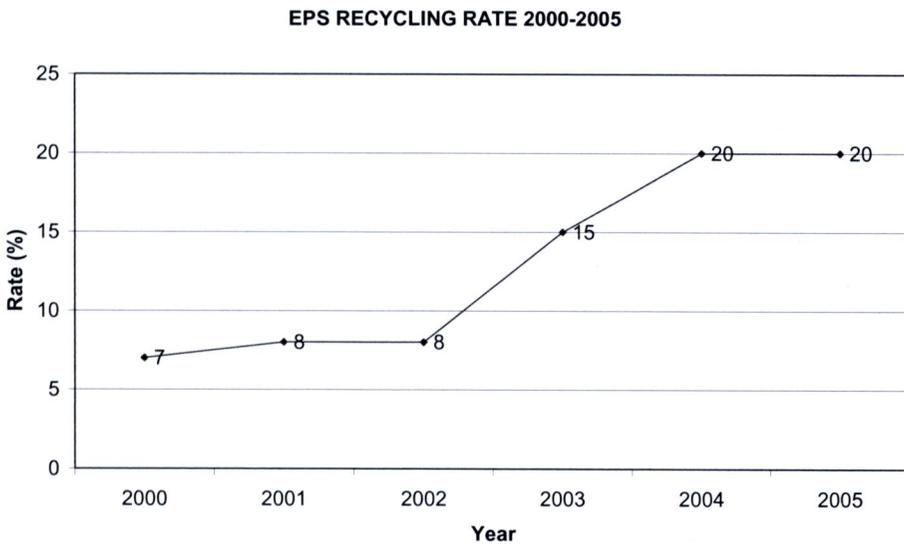
4) นำไปเผาเพื่อนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่ (Energy recovery) ซึ่งพลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปของความร้อน ผลผลิตที่ได้จากการเผาคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และเถ้า ซึ่งไม่มีพิษต่อสิ่งแวดล้อม แม้แต่โพลีเอทิลีน (EPS) เกรด F ซึ่งมีสารหน่วงไฟอยู่ ก็จะปล่อย Hydrogen halide ออกมาอีกเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งไม่มีผลใดๆ ที่วัดได้ ความร้อนที่ได้สามารถนำกลับไปใช้ หรือผลิตไอน้ำหรือไฟฟ้าได้

ในทางปฏิบัติ ขยะโพลีเอทิลีน (EPS) ส่วนใหญ่มักถูกนำไปใช้ถมถนน ซึ่งอาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่คุ้มค่าที่สุดเพราะถือว่าการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่ยังไม่คุ้มค่านัก อย่างไรก็ตาม การนำเศษโพลีเอทิลีน (EPS) ไปถมถนนก็มีข้อดีเพราะโพลีเอทิลีน (EPS) เสริมสภาพซ้าทำให้ดินทรุดตัวสม่ำเสมอขึ้น ไม่มีกลิ่นรบกวน ไม่มีการปล่อยสารพิษสู่อากาศ ดินและน้ำ ต่างจากขยะทั่วไปซึ่งอาจทำให้เกิดก๊าซมีเทนซึ่งลุกไหม้ได้ นอกจากนี้ เม็ดโพลีเอทิลีน (EPS) ยังช่วยเพิ่มช่องว่างในเนื้อดินให้อากาศหมุนเวียนได้

ตั้งแต่ พ.ศ.2541-2548 การบริโภคโพลีเมอร์ EPS ในประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ (รูปที่ 3.2) ในขณะที่อัตราการรีไซเคิลโพลีเมอร์ EPS ในประเทศก็สูงขึ้นเช่นเดียวกันโดยเฉพาะตั้งแต่ พ.ศ. 2545 เป็นต้นมา (รูปที่ 3.3) ทั้งนี้ ผู้ประกอบการผลิตโพลีเมอร์ EPS ในประเทศไทยมีศักยภาพและแรงจูงใจที่จะนำโพลีเมอร์ EPS กลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้ในระดับหนึ่ง เพื่อลดต้นทุนการผลิตและการจัดการของเสียซึ่งมีปริมาณประมาณ 125 ตัน หรือไม่เกิน 5 % นอกจากนี้ยังมีผู้รับซื้อเศษโพลีเมอร์เพื่อนำไปรีไซเคิลเป็นพลาสติกโพลีโพรพิลีนเกรดต่ำอีกด้วย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงปริมาณการบริโภคโพลีเมอร์ EPS ในประเทศ ตั้งแต่ พ.ศ. 2541-2548 [3]



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงอัตราการรีไซเคิลโพลีเมอร์ EPS ในประเทศ ตั้งแต่ พ.ศ. 2543-2548 [4]

อย่างไรก็ตาม การนำโพนั้ EPS ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างไปรีไซเคิลนั้นยากกว่าการนำโพนั้ EPS ในรูปของบรรจุภัณฑ์ไปรีไซเคิลมาก ดังนั้น ในความเป็นจริงการนำโพนั้ EPS ที่ใช้ก่อสร้างอาคารไปรีไซเคิลอาจทำได้จำกัด

#### 1.4 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

ในช่วงไม่กี่ปีมานี้ ประเด็นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมถือว่ามีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะการสร้างสถาปัตยกรรมและการพัฒนาอย่างยั่งยืน ดังนั้น อุตสาหกรรมก่อสร้างจึงได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับข้อมูลด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวัสดุก่อสร้างมากขึ้น วิธีการประเมินผลกระทบที่น่าเชื่อถือและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การประเมินตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ หรือ Life Cycle Assessment (LCA) เนื่องจากการสำรวจกระบวนการทั้งหมดของชีวิตวัสดุ ตั้งแต่การผลิต การใช้งาน และการทำลายวัสดุนั้นๆ (Cradle-to-grave) ในปี 1998 ได้มีการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดชีวิตของโพนั้ EPS ปริมาณ 1 กิโลกรัม ที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 15-20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดย PRC-Bouwcentrum ในประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยมีวิธีการทดสอบตามมาตรฐานของ The Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) และ ISO 14040 ได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของโพนั้ EPS ด้วยวิธีการประเมินตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) [5]

| Environmental effect/aspect                           | Abbreviation    | Characterisaion scores | Unit                 | Normalisation scores | Unit <sup>b</sup> |
|---|-----------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Environmental impact                                  |                 |                        |                      |                      |                   |
| Abiotic depletion                                     | ADP             | 0,83                   | 1                    | 1,04E-11             | a                 |
| Global warming  | GWP             | 5,98                   | kg                   | 1,42E-12             | a                 |
| Ozone depletion                                       | ODP             | 2,11E-06               | kg                   | 3,75E-14             | a                 |
| Human toxicity  | HCT             | 0,0357                 | kg                   | 9,06E-13             | a                 |
| Aquatic ecotoxicity                                   | ECA             | 101                    | M <sup>3</sup>       | 2,29E-13             | a                 |
| Smog  | POCP            | 0,0207                 | kg                   | 3,28E-12             | a                 |
| Acidification   | AP              | 0,0278                 | kg                   | 8,19E-13             | a                 |
| Nutrication   | NP              | 0,00241                | kg                   | 2,81E-13             | a                 |
| Land use  | LU <sup>t</sup> | 0,00274                | m <sup>2</sup>       |                      | a                 |
| Environmental indicator                               |                 |                        |                      |                      |                   |
| Cumulative energy demand (excluding feedstock energy) | CED             | 48,9                   | MJ(lhv) <sup>a</sup> | 8,45E-13             | a                 |

| Environmental effect/aspect                           | Abbreviation | Characterisaion scores | Unit                 | Normalisation scores | Unit <sup>b</sup> |
|---|--------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| Cumulative energy demand (including feedstock energy) | CED+         | 93,1                   | MJ(lhv) <sup>a</sup> | 1,61E-12             | a                 |
| Non toxic final waste                                 | W-NT         | 0,0453                 | kg                   | 8,43E-14             | a                 |
| Toxic final waste                                     | W-T          | 0,0124                 | kg                   | 3,09E-13             | a                 |
| <sup>a</sup> lhv = lower heating value.               |              |                        |                      |                      |                   |
| <sup>b</sup> a = year                                 |              |                        |                      |                      |                   |

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางเป็นข้อมูลที่อ้างอิงจากต่างประเทศ ข้อมูลในประเทศอาจจะไม่เหมือนกันเนื่องจากความแตกต่างทางบริบท เช่น แหล่งวัตถุดิบ วิธีการผลิต วิธีการขนส่ง เป็นต้น

ตลอดวัฏจักรชีวิตของโพน EPS ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น (การปล่อยก๊าซสู่ชั้นบรรยากาศ) จะเกิดขึ้นในช่วงการผลิตวัตถุดิบของโพน EPS และช่วงการขนส่งผลิตภัณฑ์โพน EPS ไปสู่ผู้ใช้เท่านั้น ก๊าซเพนเทน (Pentane) ที่ใช้เป็นสารทำให้ฟู (Blowing agent) นี้จะถูกปล่อยออกมาในช่วงการผลิตโพน EPS ซึ่งมีผลน้อยมากต่อการทำให้โลกร้อน

ในการผลิตโพน EPS ในปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ไม่มีการใช้สาร CFCs หรือ HCFCs แล้ว ดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อชั้นโอโซนแตกต่างจากวัสดุก่อสร้างทั่วไปเช่นกัน

**ตารางที่ 3.3** ค่าพลังงานเบื้องต้นที่ใช้ในการผลิตโพน EPS เทียบเท่ากับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง [6]

| EPS TYPE | DENSITY (kg/m <sup>3</sup> ) | PRIMARY ENERGY       |                        | FUEL-OIL EQUIVALENT |        |
|----------|------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|--------|
|          |                              | (MJ/m <sup>3</sup> ) | (kW-h/m <sup>3</sup> ) | Kg                  | LITRES |
| PS 15 SE | 15                           | 540                  | 151                    | 12.6                | 15.1   |
| PS 20 SE | 20                           | 680                  | 190                    | 15.8                | 19     |
| PS 30 SE | 30                           | 960                  | 269                    | 22.4                | 26.9   |

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางเป็นข้อมูลที่อ้างอิงจากต่างประเทศ ข้อมูลในประเทศอาจแตกต่างกัน

การใช้พลังงานเบื้องต้นในการผลิตโพน EPS แปรตามความหนาแน่นของโพน จากตารางค่าพลังงานเบื้องต้น (ไม่รวมค่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตวัตถุดิบที่ใช้ทำโพน EPS) ที่ใช้ในการผลิตโพน EPS ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าตั้งแต่ 151-269 กิโลวัตต์ชั่วโมง (544-968 เมกะจูลส์) ซึ่งเทียบเท่ากับการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง 15-27 ลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับพลังงานในการทำความร้อนที่ประหยัดได้ในเวลา 6 เดือนหรือน้อยกว่า เมื่อใช้โพน EPS ขนาดดังกล่าวเป็นฉนวนกันความร้อนให้กับอาคาร

## 2. โพน XPS (Extruded Polystyrene Foam)

โพน XPS (Extruded Polystyrene Foam) เป็นโพน PS ที่ใช้กระบวนการยึดต่อเนื่อง (Homogeneous cellular structure) มีความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุมากกว่า เนื่องจากมีเซลล์ปิดและมีผิวเรียบแน่น กระบวนการผลิตโพน XPS เริ่มจากการนำผงพลาสติก PS มาทำให้ละลายแล้วเติม Blowing Agent เข้าไป จากนั้นจึงนำไปยึดขึ้นรูปภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง แล้วทำให้เย็นตัวลง โพน XPS ที่ได้สามารถนำไปตัดตามขนาดที่ต้องการด้วยลวดความร้อนหรือมีดคัตเตอร์

โพน XPS ที่ใช้กันทั่วไปมีความหนาแน่น 30-50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะภายนอกทั่วไปคล้ายโพน PU แต่มีคุณสมบัติทางกายภาพดีเยี่ยม มีเนื้อเหนียวและแข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับโพนแข็งประเภทอื่น คุณสมบัติเด่นอีกข้อหนึ่ง คือ มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำมากจนเกือบเป็นศูนย์ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นเซลล์ปิด จึงทำให้โพน XPS ไม่มีการยึดหดตัวหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต ในปัจจุบันยังไม่มีผู้ผลิตโพน XPS ในประเทศไทย แต่มีผู้ผลิตแผ่นผนัง Structural Insulated Panels (SIP) ในประเทศบางรายนำเข้ามาจำหน่าย แต่ยังไม่แพร่หลายเนื่องจากมีราคาแพง [7]

## 3. โพนโพลียูรีเทนแบบแข็ง (Rigid Polyurethane Foam – โพน PU)

โพน PU ทำจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง หรือ เทอร์โมเซต (Thermosetting หรือ Thermoset) โดยทั่วไป โพน PU แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบ Flexible แบบ Rigid และแบบ Semi-rigid แต่หากแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของเซลล์ จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภทเช่นกัน ได้แก่ แบบ Closed-cell แบบ Open-cell และแบบ Mixed Type โพน PU แบบ Closed-cell จะมีความเป็นฉนวนมากกว่า ส่วนแบบ Open-cell จะมีคุณสมบัติในการกันเสียงได้ดีกว่า รวมทั้งยอมให้ก๊าซและไอน้ำซึมผ่านได้มากกว่า สำหรับโพน PU ที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Rigid และมี Closed-cell อยู่กว่า 90% มีสีธรรมชาติเป็นสีเหลืองอ่อน เป็นพลาสติกที่มีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อนและแรงอัด ทำให้เกิดการแข็งตัว จะนำไปหลอมละลายนำกลับมาใช้ใหม่อีกไม่ได้ ลักษณะการเรียงตัวของพอลิเมอร์เป็นแบบเชื่อมโยงหรือร่างแห (Cross-linked หรือ Network shape) โครงสร้างแบบนี้ทำให้พอลิเมอร์มีความหนาแน่นสูง มีความแข็งแรง ทนความร้อนได้ดี

ในประเทศไทย โฟม PU นิยมนำมาใช้ในการผลิตแผ่นผนัง SIP สำหรับห้องเย็น โดยปัจจุบันผู้ประกอบการสามารถผลิตแผ่นผนัง SIP ที่ใช้โฟม PU ความหนาแน่น 2.5 ปอนด์ต่อตารางฟุต เป็นไส้กลาง ประกบด้วยเหล็กแผ่นบาง (Metal sheet) โดยสามารถผลิตให้มีขนาดใหญ่ได้ตามความต้องการของงานก่อสร้างโดยทั่วไป

### 3.1 ปฏิกริยาต่อไฟ

เนื่องจากโฟม PU เป็นเทอร์โมเซตติง จึงไม่ละลายเมื่อถูกไฟไหม้ โฟม PU ที่เติมสารกันไฟลามแล้วเมื่อไหม้ไฟจะสร้างผิวถ่าน (Carbonaceous char) ขึ้นมาแทน หากมีสารเคมีที่มีส่วนผสมถูกต้องแล้ว ผิวถ่านดังกล่าวจะมีความมั่นคงแข็งแรงต่อต้านทานความเสียหายของโครงสร้างเมื่อไหม้ไฟได้ซึ่งดูได้จากดัชนี Isocyanurate ที่มีค่าสูง และชนิดของสารกันไฟลามที่เติมเข้าไปในเนื้อโฟม นอกจากนี้ การที่โครงสร้างทางเคมีของโฟม PU เป็นแบบ Cross-linked สามมิติ จึงทำให้โฟม PU ไม่หดตัวหนีจากเปลวไฟ

โฟม PU จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 150-200 องศาเซลเซียส และจะลุกไหม้ได้ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส การเผาไหม้ของโฟม PU จะปล่อยควันจำนวนมากออกมา เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส ก๊าซพิษบางอย่าง เช่น ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogencyanide) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะเริ่มก่อตัวขึ้น

### 3.2 การรีไซเคิล

โฟม PU ที่ใช้กับอาคารถือเป็นผลิตภัณฑ์มีอายุการใช้งานยาวนานมาก ดังนั้น การนำโฟม PU ดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่จะต้องทำภายหลังจากอาคารนั้นๆ ถูกทำลาย ซึ่งวิธีการรีไซเคิลอาคารในปัจจุบันทำให้ไม่สามารถเก็บหรือแยกโฟม PU จากเศษวัสดุหรือซากอาคารกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ การที่โฟม PU มีสารกันไฟลามบางตัวซึ่งอาจเป็นพิษผสมอยู่ด้วยนั้น ทำให้ไม่สามารถนำโฟม PU มารีไซเคิลได้ เพราะเมื่ออาคารถูกทำลาย ก็ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าสารกันไฟลามที่ใช้เป็นชนิดใด ดังนั้น วิธีการที่เหมาะสมในการจัดการของเสียจากโฟม PU ที่ไม่ทราบส่วนผสมที่แน่ชัด คือนำโฟม PU ไปเผาเพื่อให้ได้พลังงานกลับมาใช้ใหม่

### 3.3 ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 3.4 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของโฟม PU ด้วยวิธีการประเมินตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) [8]

| Impact category      | Unit     | Production |
|----------------------|----------|------------|
| Energy               | MJ       | 3.64E+00   |
| Waste (Non Chemical) | kg       | 7.82E-01   |
| Waste (Chemical)     | kg       | 1.09E-03   |
| Human toxicity       | Kg 1,4DB | 1.03E-02   |

| Impact category          | Unit                  | Production |
|--------------------------|-----------------------|------------|
| Abiotic depletion        | Kg Sb                 | 1.67E-02   |
| Ecotoxicity, aquatic     | Kg 1,4DB              | 2.16E-03   |
| Ecotoxicity, sediment    | Kg 1,4DB              | 4.06E-03   |
| Ecotoxicity, terrestrial | Kg 1,4DB              | 6.04E-05   |
| Acidification            | Kg SO <sub>2</sub>    | 1.17E-03   |
| Eutrophication           | Kg PO <sub>4</sub> -- | 1.49E-04   |
| Climate change           | Kg CO <sub>2</sub>    | 2.40E-01   |
| Photo-oxidant formation  | Kg ethane             | 1.54E-04   |
| Ozone depletion          | Kg CFC11              | 2.60E-08   |

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางเป็นข้อมูลที่อ้างอิงจากต่างประเทศ ข้อมูลในประเทศอาจแตกต่างกัน

#### 4. โพลีเมอร์แข็ง (Rigid Polyvinylchloride Foam – โพลีเมอร์ PVC)

โพลีเมอร์ที่ทำจาก PVC เมื่อพิจารณาตามลักษณะเซลล์ จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ Open-cell และแบบ Closed-cell แบบ Open-cell จะมีความนุ่มและยืดหยุ่น ส่วนแบบ Closed-cell จะมีลักษณะแข็ง โพลีเมอร์ PVC ทั้งสองแบบทำจาก Plastisols ซึ่งเป็นผงเรซินที่มีความละเอียดมากแขวนลอย (Suspensions) อยู่ใน Plasticizer โดยที่พอลิเมอร์จะไม่ละลายใน Plasticizer จนกว่าจะเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โพลีเมอร์ PVC ที่ใช้ในงานก่อสร้างเป็นโพลีเมอร์แบบ Cross-linked ซึ่งเป็น Closed-cell ดังนั้น ในที่นี้จะกล่าวถึงโพลีเมอร์ PVC ประเภท Closed-cell เป็นหลัก

##### 4.1 ปฏิกิริยาต่อไฟ

โพลีเมอร์ PVC แบบแข็งจัดเป็นวัสดุไม่ลามไฟตามธรรมชาติอยู่แล้ว เนื่องจากมีส่วนประกอบของคลอรีนอยู่สูงถึง 56.7%

##### 4.2 การรีไซเคิล

PVC มีคุณสมบัติสามารถนำกลับมาใช้อีกได้ ทั้งนี้ เทคโนโลยีในปัจจุบันเริ่มมีการพัฒนามากขึ้นเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับทั้ง Mechanical Recycling และ Chemical Recycling ซึ่งสามารถลดการใช้วัตถุดิบและพลังงานในกระบวนการผลิต

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน ตลาดและความนิยมในการนำ PVC กลับมาใช้ใหม่นั้นยังไม่เป็นที่นิยมนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนาเนื่องจากต้นทุนที่สูงของกระบวนการย่อยและผสมเรซินใหม่ในการผลิตซ้ำเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เรซินบริสุทธิ์ (Virgin resin) ในการผลิตใหม่ นอกจากนี้ การเลือกใช้ Recycled Product นั้นขึ้นอยู่กับรูปลักษณะทางกายภาพเป็นหลัก เมื่อไม่สามารถทำการรีไซเคิล PVC ได้อย่างเต็มที่ PVC จึงถือเป็นวัสดุที่เป็นปัญหาในด้านการจัดการขยะ



2-5 ปีแรก แล้วจะค่อยๆ คงที่ ทำให้ค่าการนำความร้อนอาจสูงขึ้นเป็น 0.024-0.030 วัตต์/ม.<sup>๒</sup>เคลวิน ยกเว้นว่าจะมีการติดฟิล์มที่ผิวหน้าโพน (Diffusion retarding) นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการนำความร้อนของโพน PU อีกคือ น้ำและความชื้นที่อาจแทรกซึมเข้าไปในเนื้อโพน ซึ่งจะทำให้โพนมีค่าการนำความร้อนสูงขึ้น

จากตารางที่ 3.5 โพน PU มีค่าการนำความร้อน (Conductivity) ต่ำที่สุด จึงทำให้โพน PU ได้รับความนิยมในการใช้เป็นฉนวนให้แผ่นผนัง กรณีที่มีอุณหภูมิใช้งานแตกต่างจากอุณหภูมิภายนอกมากๆ และไม่ต้องการให้ผนังมีความหนามากเกินไป ส่วนโพน XPS มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าโพน PU เล็กน้อย ในขณะที่โพน EPS มีค่าการนำความร้อนสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของโพนทั้ง 3 ชนิด กับวัสดุอื่นๆ ที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน ยังมีค่าต่ำกว่ามาก (ค่าการนำความร้อนของวัสดุอื่นๆ - คอนกรีต 1.442 อิฐ 1.154 และคอนกรีตมวลเบา 0.13 วัตต์/เมตร.<sup>๒</sup> เคลวิน) จึงจัดว่าโพนทั้ง 3 ชนิด เป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนสูงอยู่แล้ว ซึ่งการนำแผ่นโพนมาประยุกต์ใช้กับบ้านประหยัดพลังงานนั้น ในประเทศไทยไม่จำเป็นต้องใช้โพนชนิดที่มีค่า R สูงสุดเสมอไป ดังนั้น ค่าการนำความร้อนของโพนจึงเป็นเพียงปัจจัยหนึ่ง ในการตัดสินใจเลือกชนิดโพนเพื่อการผลิต ICF ควรต้องพิจารณาคุณสมบัติที่สำคัญด้านอื่นประกอบด้วย

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของโพนที่จำหน่ายในประเทศ [10, 11, 12]

| ที่ | รายละเอียด               | หน่วย                        | โพน EPS  | โพน XPS              | โพน PU               |
|-----|--------------------------|------------------------------|--|----------------------|----------------------|
| 1   | ความหนาแน่น              | กก./ลบ.ม.                    | 24   | 28                   | 40                   |
| 2   | ปริมาณการดูดซึมน้ำ       | % ของ นน.                    | 3.8-4.0  | 0.5                  | 2-5                  |
| 3   | ปริมาณการแทรกซึมความชื้น | กรัม/(พาสคาล.วินาที.ตร.ม.)   | $0.6 \times 10^{-7}$ -<br>$2.0 \times 10^{-7}$ | $6.3 \times 10^{-8}$ | $1.1 \times 10^{-7}$ |
| 4   | อุณหภูมิใช้งาน           | เซลเซียส                     | 80 (เริ่มหดตัว)                                | -50/+75              | -45/+200             |
| 5   | ค่าการนำความร้อน         | วัตต์/ม. <sup>๒</sup> เคลวิน | 0.036  | 0.024                | 0.017-0.019          |
| 6   | สภาพการติดไฟ             |                              | เกรด N<br>สามารถลุกไหม้                        | NA                   | ชะลอ<br>การลามไฟ     |
|     |                          |                              | เกรด F<br>ไม่ลามไฟ                             |                      |                      |
| 7   | ระดับการกระจายของเปลวไฟ  | ไม่เกิน 75                   | 5-25   | 5                    | 20                   |
| 8   | ระดับการเกิดควัน         | ไม่เกิน 450                  | 10-400   | 165                  | 250                  |

หมายเหตุ: โพน EPS แบ่งเป็น เกรด N คือ ชนิดธรรมดา และ เกรด F คือ ชนิดเติมสารหน่วงไฟ

เมื่อเปรียบเทียบระดับการกระจายของเปลวไฟ และระดับการเกิดควันของโพนั้ทั้ง 3 ชนิด พบว่า โพนั้ XPS จะมีค่าต่ำที่สุด (165) ส่วนโพนั้ PU จะมีค่าสูงที่สุด (250) เมื่อไหม้ไฟโพนั้ EPS จะปล่อยก๊าซพิษออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าโพนั้ PU และไม้ อย่างไรก็ตาม ก๊าซพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของโพนั้ทั้ง 3 ชนิด ยังเป็นอันตรายน้อยกว่าการเผาไหม้ของไม้ หรือวัสดุก่อสร้างบางชนิดที่มีส่วนผสมของสารฟอร์มาลดีไฮด์

จากตารางที่ 3.6 เมื่อเปรียบเทียบโพนั้ทั้ง 3 ชนิดที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน โพนั้ XPS จะมีคุณสมบัติในการต้านทานแรงได้ดีที่สุด (ความต้านทานแรงอัด, แรงดึง และแรงเฉือน) ส่วนโพนั้ EPS สามารถต้านทานแรงอัดได้ใกล้เคียงกับ โพนั้ PU แต่สามารถต้านทานแรงดึงได้มากกว่าโพนั้ PU

ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลของโพนั้แต่ละประเภท [13]

| ที่ | รายละเอียด          | หน่วย         | โพนั้ EPS   | โพนั้ PU | โพนั้ XPS |
|-----|---------------------|---------------|-------------|----------|-----------|
| 1   | ความหนาแน่น         | กก./ลบ.ม.     | 24          | 32       | 28        |
| 2   | ความต้านทานแรงอัด   | นิวตัน/ตร.มม. | 0.075-0.175 | 0.146    | 0.25      |
| 3   | ความต้านทานแรงดึง   | นิวตัน/ตร.มม. | 0.165-0.360 | 0.146    | 0.45      |
| 4   | ความต้านทานแรงดัด   | นิวตัน/ตร.มม. | 0.175-0.350 | NA       | NA        |
| 5   | ความต้านทานแรงเฉือน | นิวตัน/ตร.มม. | NA          | 0.171    | 0.25      |

## 5.2 ราคาโพนั้

โพนั้ PU มีราคาประมาณเป็น 2-3 เท่าของราคา โพนั้ EPS ชนิดเติมสารหน่วงไฟ (เกรด F) เมื่อมีความหนาแน่น 40 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร เท่ากัน ส่วนหนึ่งเนื่องจากโพนั้ PU ต้องนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศ และมีผู้ผลิตน้อยรายกว่าโพนั้ EPS ส่วนโพนั้ XPS มีราคาสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโพนั้อีก 2 ชนิด และปัจจุบันยังต้องอาศัยการนำเข้าเท่านั้น

## 5.3 การใช้งาน

โพนั้ PU ยุบตัวเมื่อมีแรงกระทำ อาจเสียหายง่ายจากการขนส่งและการติดตั้ง โพนั้ PU เป็นกาวในตัวเมื่อไหม้ไฟจะกลายเป็นถ่านยังสามารถรับน้ำหนักได้บางส่วน ส่วน EPS เมื่อไหม้ไฟจะกลายเป็นหยดของเหลว มีราคาต่ำสุด และมีความเป็นฉนวนที่ดี ป้องกันการรั่วซึมของน้ำและอากาศได้ มีความแข็งแรงพอสมควร สามารถผลิตเป็นแผ่นหรือหล่อตามแบบได้

โพนั้ XPS โดยทั่วไปมีราคาแพงกว่าโพนั้ EPS มีความเป็นฉนวนดีกว่าโพนั้ EPS ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และมีความต้านทานการซึมน้ำดีกว่า มีความแข็งแรงสูงกว่า มักจะผลิตเป็นแบบแผ่นเท่านั้น ปัจจุบันประเทศไทยยังต้องอาศัยการนำเข้าอยู่ โพนั้ PU แบบแข็งมีการต้านทานความร้อนสูงกว่าโพนั้ EPS และโพนั้ XPS และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ทัดเทียมกัน แต่มักจะมีราคาสูงกว่า สามารถผลิตในแม่แบบเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ICF ได้ ส่วนโพนั้ที่เรียกว่า Polyisocyanurate มักจะผลิตเป็นแผ่น แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ICF โพนั้ PVC

แข็งมีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพนประเภทอื่น ผลิตภัณฑ์โพน PVC ที่ผลิตในประเทศส่วนใหญ่เป็นโพนที่มีความหนาแน่นสูงและผลิตเพื่อใช้ทดแทนไม้เป็นส่วนใหญ่ ยังไม่มีผู้ประกอบการที่ผลิตโพน PVC แบบแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำสำหรับผลิตเป็นผนัง SIP และ ICF ในประเทศไทย

## 6. สรุปเหตุผลที่เลือกใช้โพน EPS เพื่อการผลิต ICF

ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมและการตลาด วัตถุประสงค์ความพร้อมของอุตสาหกรรมในประเทศเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ICF เนื่องจากมีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตและราคาผลิตภัณฑ์โดยตรง ประกอบกับการนำคุณสมบัติของโพนทั้ง 3 ชนิด (EPS หรือ XPS และ PU) มาเปรียบเทียบกันทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและคุณภาพเชิงกลแล้ว ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก จึงสามารถใช้แทนกันได้ โดยโพนแต่ละชนิดอาจมีสูตรการผลิตที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้คุณสมบัติบางประการที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันได้ ในการออกแบบแผ่นผนังชดเชยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของโพนแต่ละชนิดได้โดยการกำหนดความหนาแน่นของเนื้อโพน หรือความหนาของแผ่นโพนได้ ปัจจัยสำคัญในการเลือกชนิดโพนจึงอยู่ที่ราคาและกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นต้นทุนผลิตภัณฑ์โพนโดยตรง และแผ่น ICF ที่ผลิตขึ้นใช้งานนั่นเอง

ในการศึกษานี้จึงได้เลือกโพน EPS มาใช้เป็นวัสดุสำหรับการออกแบบหรือผลิตชิ้นส่วนผนัง ICF เนื่องจากมีอุตสาหกรรมรองรับ และมีราคาถูกกว่าโพนชนิดอื่นๆ และปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตโพน XPS หรือ PVC เพื่อใช้เป็นวัสดุฉนวนแต่อย่างใด

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโพน PVC มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ในการผลิต ICF ในประเทศไทยได้ดี เนื่องจากมีกำลังสูง มีวัตถุประสงค์หรือผลิตได้ในประเทศ และอาจนำเศษ PVC เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้ในกระบวนการผลิตได้ การศึกษานี้ (บทที่ 4) จึงได้ทดลองศึกษาสูตรและคุณสมบัติของ PVC เบื้องต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพัฒนา หรือทำวิจัยเรื่องนี้ในอนาคตต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] จรรย์พัฒน์ ภูวนันท์ และคณะ, การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ระบบการก่อสร้าง **Structural Sandwich Panels** เพื่อใช้กับบ้านประหยัดพลังงานในประเทศไทย (นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2550).
- [2] EUMEPS, **Behaviour of EPS in Case of Fire** [Online], accessed 12 July, 2008. Available from <http://www.eumeps.org/pdfs/behaviour.pdf>
- [3] สมาคมอุตสาหกรรม รีไซเคิลโพนพลาสติกไทย
- [4] Ibid.
- [5] EUMEPS, **EPS White Book, EUMEPS Background Information on Standardisation of EPS** [Online], accessed July 7, 2008. Available from [http://www.eumeps.org/literat/pdfs/White%20Book\\_public\\_2004-04.pdf](http://www.eumeps.org/literat/pdfs/White%20Book_public_2004-04.pdf), p.35.
- [6] EUMEPS, **Reducing Climate Change with EPS Insulation** [Online], accessed July 7, 2008. Available from <http://www.eumeps.org/pdfs/climate.pdf>.
- [7] จรรย์พัฒน์ ภูวนันท์ และคณะ, การศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ระบบการก่อสร้าง **Structural Sandwich Panels** เพื่อใช้กับบ้านประหยัดพลังงานในประเทศไทย
- [8] J.P.R. Meijer, **Environmental Profile of 1K PULYURETHANE FOAM Packed in Pressurised Cans, LCA for the PDR and Associated Producers** [Online], accessed 19 July, 2008, Available from <http://www.akpu.org/lca/PDR%20Summery%2018.12.02.pdf>.
- [9] Baitz Martin and others, "Life Cycle Assessment of PVC and of Principal Competing Materials," **Report** (European Commission, July 2004).
- [10] ข้อมูลจากผู้ผลิตในประเทศ
- [11] J. M. Davies. **Lightweight Sandwich Construction**, (London: Blackwell Science, 2001), 30.
- [12] Pieter A. VanderWerf and others, **Insulating Concrete Forms for Residential Design and Construction** (New York: McGraw-Hill, 1997), 69, 77.
- [13] ข้อมูลจากผู้ผลิตในประเทศ

