# บทที่ 2
# ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไพโรเทคนิค

## ประวัติศาสตร์ของไพโรเทคนิค

วิชาทางด้านไพโรเทคนิคเป็นวิชาที่เกิดขึ้นมานานแล้ว มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จากอดีตถึงปัจจุบัน ดังพอจะสรุปได้ดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ศตวรรษที่ 1 | จีน, อินเดีย | ผสมดินประสิว, ซัลเฟอร์ และถ่านเข้าด้วยกัน |
| ศตวรรษที่ 7 | จีน | ดินดำ (Black powder) |
| ศตวรรษที่ 8 | ไบแซนเทียม | ไฟกรีก (ซัลเฟอร์, ดินประสิว, การบูร, น้ำมัน ฯลฯ) |
| ศตวรรษที่ 12 | อาหรับ | ดินดำจากจีนเข้าสู่บริเวณเมดิเตอร์เรเนียน |
| ค.ศ. 1231 | จีน | ลูกระเบิดมือลูกแรก |
| ค.ศ. 1242 | อังกฤษ | นิยามคำว่าดินดำ |
| ค.ศ. 1259 | จีน | ปืนใหญ่กระบอกแรก |
| ค.ศ. 1326 | ฟลอเรนซ์ (Republic of Florence) | ปืนใหญ่กระบอกแรกในยุโรป |
| ค.ศ. 1360 | เยอรมัน | ค้นพบดินดำอีกครั้ง |
| ค.ศ. 1520 | โปรตุเกส | ปืนใหญ่กระบอกแรกบนเรือ (ใช้ดินดำที่เป็นผงละเอียด) |
| ค.ศ. 1630 | ฮังการี | ใช้ดินดำสำหรับระเบิดเหมืองแร่ |
| ค.ศ. 1750 | ฝรั่งเศส | ค้นพบโปตัสเซียมคลอเรต |
| ค.ศ. 1786 | โรงงาน Essonnes powder | เกิดอุบัติเหตุครั้งใหญ่ครั้งแรก (ผลิตดินดำกับโปตัสเซียมคลอเรต) |
| ค.ศ. 1838 | ฝรั่งเศส | ใช้ดินปืนกับกรดปิคริคสำหรับปืนใหญ่ |
| ค.ศ. 1845 | สวิซเซอร์แลนด์ | ค้นพบดินระเบิด |
| ค.ศ. 1847 | อิตาลี | ค้นพบไนโตรกลีเซอร์รีน |
| ค.ศ. 1870 | สวีเดน | ค้นพบวัตถุระเบิดชนิดแรง ทำจากเมอร์คิวรีเฟอร์มิเนต ค้นพบไดนาไมต์ |
| ค.ศ. 1874 | เบลเยี่ยม | ค้นพบการระเบิดเหมืองก๊าซ (อัมโมเนียมไนเตรด) |
| ค.ศ. 1884 | ฝรั่งเศส | ค้นพบดินดำไม่มีควัน ชนิด Single-base |

| | | |
|---|---|---|
| ค.ศ. 1888 | สวีเดน | ค้นพบดินดำไม่มีควัน ชนิด Double-base |
| ค.ศ. 1891 | เยอรมัน | พัฒนายุทโธปกรณ์ TNT |
| ค.ศ. 1897 | อังกฤษ | พัฒนาระเบิดที่ทำจาก Tetryl, Hexogen, Octogen ฯลฯ พัฒนาระเบิดพลาสติก อุตสาหกรมทางทหารเจริญเติบโต |

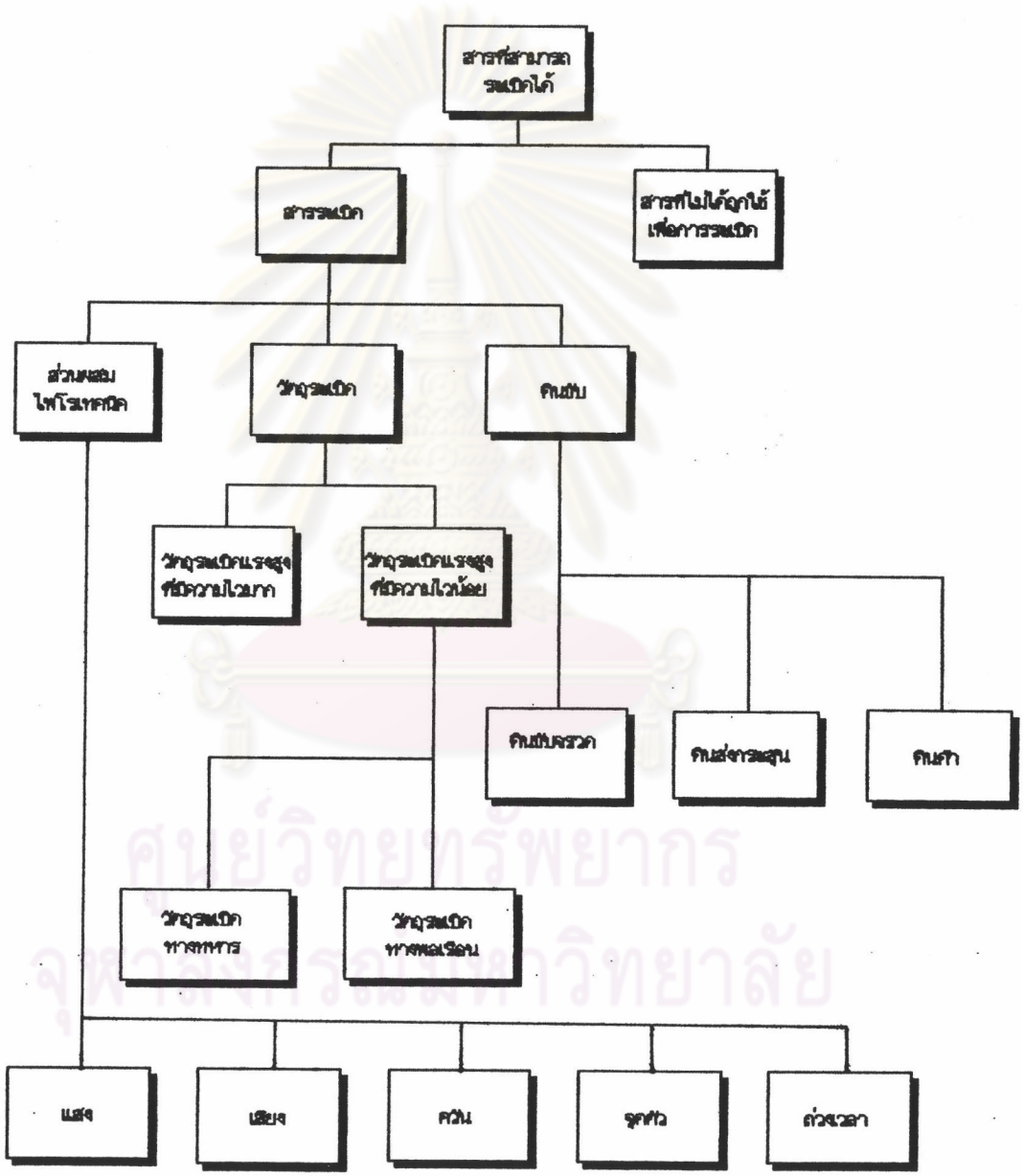
ในส่วนของไพโรเทตนิตทางด้านดอกไม้ไฟอย่างเดียว จะสรุปได้ดังนี้

| | | |
|---|---|---|
| ศตวรรษที่ 1 | จีน | ใช้ดอกไม้ไฟในงานฝังศพ (เสียงและควัน) |
| ศตวรรษที่ 14 | มาโคร์โปโล | เดินทางมาถึงจีน |
| ค.ศ. 1487 | อังกฤษ | ใช้ดอกไม้ไฟกับจรวด |
| ค.ศ. 1530 | ฝรั่งเศส (ปารีส) | แสดงดอกไม้ไฟกับจรวด |
| ค.ศ. 1612 | ฝรั่งเศส (ปารีส) | แสดงดอกไม้ไฟกับจรวด |
| ค.ศ. 1700 | อังกฤษ | ค้นพบ Brock's Firework |
| ค.ศ. 1739 | ฝรั่งเศส | พี่น้อง Ruggieri |
| ค.ศ. 1806 | ฝรั่งเศส | ค้นพบส่วนผสมที่ให้เปลวไฟสีเขียวและสีแดง |
| ค.ศ. 1812 | ฝรั่งเศส | งานแสดงดอกไม้ไฟของ Ruggieri |
| ค.ศ. 1815 | | นำเอาอลูมิเนียม และแมกนีเซียม มาใช้ในส่วนผสมไพโรเทคนิค |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**นิยามและคำศัพท์ที่ใช้ในด้านไพโรเทคนิค**

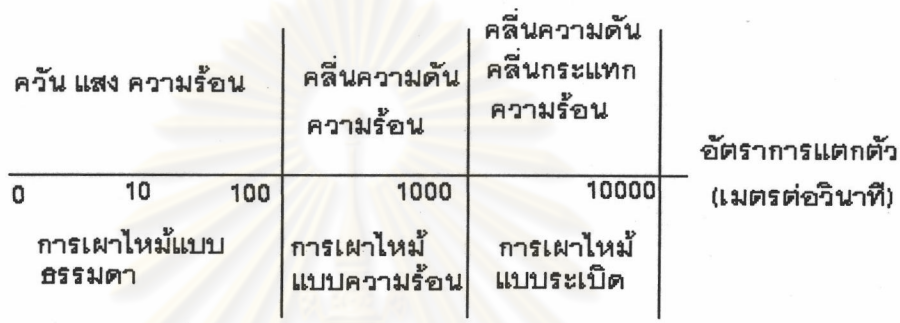
วิชาด้านไพโรเทคนิคจัดอยู่ในกลุ่มของวิชาด้านวัตถุหรือสารระเบิด ซึ่งแสดงอยู่ในรูปแผนผังได้ดังนี้




รูปที่ 2.1 แผนผังการจัดกลุ่มสารระเบิด

สารที่สามารถระเบิดได้ (Explosible substance) หมายถึงสารใด ๆ ที่สามารถระเบิดได้ หรือสามารถทำให้เกิดความเสียหายแก่บริเวณรอบๆได้ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมี (Chemical decomposition) การระเบิดในที่นี้ หมายถึงการที่ระบบปล่อยกาซจำนวนมาก ภายในระยะเวลาอันสั้น

ปฏิกิริยาการแตกตัวทางเคมี (Chemical decomposition) ของสารต่างๆ แบ่งตามระดับของความรุนแรงจากน้อยไปมากได้เป็น 3 ระดับ คือ การเผาไหม้ธรรมดา (Combustion) การเผาไหม้ความร้อนสูง( Deflagration) และ การเผาไหม้ที่มีการระเบิด (Detonation)




รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงการเผาไหม้แบบต่างๆ

การเผาไหม้ธรรมดา (Combustion) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ปฏิกิริยาสามารถดำเนินต่อไปได้เอง การเผาไหม้ที่ผิวหน้าของสารระเบิด (Explosive substance) เป็นไปอย่างช้า ๆ ความเร็วอยู่ในช่วงเมตรต่อวินาที ผลที่เกิดขึ้นคือความร้อน, ควัน, แสง ช่วงระยะเวลาที่เกิดปรากฏการณ์นาน

การเผาไหม้ความร้อนสูง (Deflagration) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothormic) ปฏิกิริยาสามารถดำเนินต่อไปได้เอง ความเร็วของการเผาไหม้ที่ผิวหน้าของสารระเบิด (Explosive substance) อยู่ในช่วงเมตรต่อวินาที ถึงหลายร้อยเมตรต่อวินาที ผลที่เกิดขึ้นคือความร้อน และคลื่นความดันขนาด 3,000-5,000 บาร์ ช่วงระยะเวลาที่เกิดปรากฏการณ์ประมาณ 1/1,000 วินาที

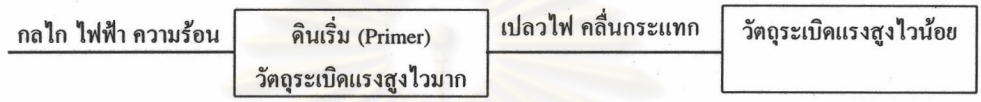
การเผาไหม้ที่มีการระเบิด (Detonation) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้เองจากคลื่นกระแทก (Shock wave) ที่เกิดขึ้น ความเร็วการเผาไหม้ที่ผิวหน้าสูงมาก อยู่ในช่วงหลายพันเมตรต่อวินาที ผลที่เกิดคือคลื่นกระแทก ขนาด 250,000 บาร์ ช่วงระยะเวลาที่เกิดปรากฏการณ์ประมาณ 1/10,000 วินาที

การเผาไหม้ธรรมดา (Combustion) เป็นปรากฏการณ์เผาไหม้ธรรมดา แต่ การเผาไหม้แบบความร้อนสูง (Deflagration) และ การเผาไหม้ที่มีการระเบิด (Detonation) เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการระเบิด (Explosive)

สารที่สามารถระเบิดได้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือวัตถุระเบิด (Explosive substance) และสารที่ไม่ได้ถูกใช้เพื่อการระเบิด (Substances not used for their explosive properties) วัตถุระเบิด แบ่งเป็นประเภทย่อยๆ ได้อีก 3 ประเภทคือ วัตถุระเบิด (Explosives) ดินขับ (Propellant) และส่วนผสมไพโรเทคนิค (Pyrotechnics composition)

1. วัตถุระเบิด (Explosives) หมายถึง สารซึ่งมีอัตราการแตกตัวแบบที่มีการระเบิด (Detonation) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ วัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวมาก (Primary explosives) และวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อย (Secondary explosives)

1.1 วัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวมาก (Primary explosives) เป็นสารที่มีความไวสูงมากในการจุดตัว จึงถูกใช้เพื่อเป็นตัวเริ่มต้นในการจุดวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อย หรือสารไพโรเทคนิค วัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวมากจะอยู่ในรูปของดินเริ่ม (Primer) มีหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานภายนอกที่ไม่เกี่ยวกับไพโรเทคนิคให้เป็นพลังงานของไพโรเทคนิค




รูปที่ 2.3 กลไกการจุดตัวของสารระเบิดขั้นที่ 2

ตัวอย่างของวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวมาก ได้แก่

ก. เมอร์คิวรี เฟอร์มิวเนต (Mercury fulminate) สูตรโมเลกุล $Hg(CNO)_2$ เป็นผลึกสีเหลือง มีความไวต่อการกระแทก (Impact) (0.19 จูล) ไฟฟ้า และความร้อน อุณหภูมิในการลุกเป็นไฟ 210 องศาเซลเซียสแต่การแตกตัว จะเริ่มที่ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วในการแตกตัว (Detonation speed) ประมาณ 5,000 เมตรต่อวินาที ถ้ามีความชื้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง และสังกะสี ปัจจุบันไม่นิยมใช้เนื่องจากความเป็นพิษ

ข. ลีดเอไซด์ (Lead aside) สูตรโมเลกุล $Pb(N_3)_2$ เป็นผลึกไม่มีสี มีความไวต่อการขัดสีมากกว่าเมอร์คิวรี เฟอร์มิวเนต อุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว 345 องศาเซลเซียส ความเร็วในการแตกตัว 4,070-5,180 เมตรต่อวินาที ปัจจุบันนิยมใช้ลีดเอไซด์ แทนเมอร์คิวรีเฟอร์มิวเนต ถ้ามีความชื้นจะทำปฏิกิริยากับทองแดง และสังกะสี สารชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน คือ แคดเมียมเอไซด์ และซิลเวอร์เอไซด์

ค. สติปเนต (Styphnate) สูตรโมเลกุล $C_6HN_3O_8P_6$ เป็นผลึกสีเหลือง มีความไวต่อการกระแทกน้อยกว่าเอไซด์ แต่ไวต่ออุณหภูมิและไฟฟ้าสถิตมากกว่า อุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว 206 องศาเซลเซียส ความเร็วในการแตกตัว 4,900-5,200 เมตรต่อวินาที เข้ากันไม่ได้กับซัลเฟอร์ และซัลไฟด์ แต่เข้ากันได้กับผงโลหะทั่วไป นิยมใช้ร่วมกับ เตตระซีน (Tetrazene) ในตัวจุด (Igniter)

ง. เตตระซีน (Tetrasene) สูตรโมเลกุล $C_2H_8N_{10}O$ เป็นผลึกไม่มีสี มีความไวสูงต่อการกระแทกอุณหภูมิที่เกิดการแตกตัว 75 องศาเซลเซียส ความเร็วในการแตกตัว 5,000 เมตรต่อวินาที เข้ากันได้กับโลหะทั่วไป นิยมใช้ร่วมกับ สติปเนต

1.2 วัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อย (Secondary explosives) เป็นสารที่มีความไวในการจุดตัวน้อย จึงต้องอาศัยวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวมาก ในการจุดตัวเสมอ แต่เมื่อจุดตัวแล้วจะมีความ

รุนแรงมากกว่าวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวมาก การใช้งานของวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อย แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ทางทหาร และประเภทที่ใช้ในอุตสาหกรรม

1.2.1 วัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อยเพื่องานทางทหาร (Military explosives) ใช้ในการบรรจุลงในอาวุธของทหารเพื่อให้ผลของการระเบิด มีความรุนแรงพอที่ทำลายกำแพงหนาๆ ได้ ตัวอย่างของวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อยเพื่องานทางทหาร ได้แก่

ก. ทีเอ็นที (Trinitrotoluene, TNT) เป็นผลึกสีเหลือง มีหลายประเภท ตามความบริสุทธิ์ และจุดหลอมเหลว (Fusion temperature) ทีเอ็นทีบริสุทธิ์ มีจุดหลอมเหลวที่ 80.85 องศาเซลเซียส ชนิด D มีจุดหลอมเหลวที่ 80.4 องศาเซลเซียส ชนิด T มีจุดหลอมเหลวที่ 80.1 องศาเซลเซียส ชนิด O มีจุดหลอมเหลวที่ 79.5 องศาเซลเซียส ชนิด M มีจุดหลอมเหลวที่ 78.0 องศาเซลเซียส ความเร็วในการแตกตัว (Detonation speed) 6,900 เมตรต่อวินาที ทีเอ็นที ค่อนข้างมีความไวต่อการกระแทกหรือการขัดสีไอหรือฝุ่นของทีเอ็นทีเป็นพิษ ไม่ทำปฏิกิริยากับโลหะทั่วไป

ข. เมลิไนท์ (Melinite) เป็นผลึกสีเหลือง ความเร็วในการแตกตัว 7,645 เมตรต่อวินาที จุดหลอมเหลว 122.5 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยากับออกไซด์และโลหะทั่วไป ยกเว้น อลูมิเนียมและดีบุก ปัจจุบันไม่ใช้แล้ว เพื่อความปลอดภัยในการทำงาน และสุขภาพ

ค. เททิล (Tetryl) เป็นผลึกสีเหลือง ความเร็วในการแตกตัว 7,850 เมตรต่อวินาที จุดหลอมเหลว 130 องศาเซลเซียส (เริ่มแตกตัว) เป็นพิษมาก จึงไม่ใช้แล้ว

ง. เฮกโซเจน (Hexogen) หรืออาร์ดีเอกซ์ (RDX) เป็นผลึกสีขาว ไวต่อการกระแทกและการขัดสี จุดหลอมเหลว 205 องศาเซลเซียส ความเร็วในการแตกตัว 8,500 เมตรต่อวินาที เฮกโซเจน มี 2 ชนิด คือ ชนิด B (มีส่วนผสมขนาด 80-200 ไมโครเมตร อยู่ 60%) ชนิด CH (มีส่วนผสมขนาด 200-800 ไมโครเมตร อยู่ 60%) การขนส่งเฮกโซเจน ควรทำให้เปียกด้วยน้ำ 10% ในการลดความไว และเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์อาจเติมกราไฟต์ลงไป 0.2% ฝุ่นของเฮกโซเจนเป็นพิษ ปัจจุบันใช้เฮกโซเจนในการทำชนวนดีโตเนติง (Detonating fuse) และใช้เป็นส่วนประกอบในคอมโพสิทพาวเดอร์ (Composite powder) และดินขับ (Propellant)

จ. ออกโตเจน (Octogen) หรือ เอชเอ็มเอ็กซ (HMX) เป็นผลึกสีขาว จุดหลอมเหลว 283 องศาเซลเซียส ไวต่อการกระแทกและเสียดสี ความเร็วในการแตกตัว 9,100 เมตรต่อวินาที เข้ากันได้กับโลหะ การใช้งานเหมือนกับเฮกโซเจน

ฉ. ไนโตรกัวนิดีน (Nitroguanidine) เป็นผลึกเข็มสีขาว จุดหลอมเหลว 232 องศาเซลเซียส เริ่มแตกตัวที่ 170 องศาเซลเซียส ไวต่อการกระแทกและเสียดสี เข้ากันไม่ได้กับสังกะสี ไม่นิยมใช้ไนโตรกัวนีดีน เพื่อเป็นวัตถุระเบิดโดยตรง แต่จะใช้เป็นส่วนผสมในมัลติเบสพาวเดอร์ (Multibase powder)

ช. พีอีทีเอ็น (PETN) เป็นผลึกสีขาว จุดหลอมเหลว 141.4 องศาเซลเซียส เริ่มแตกตัวที่ 120 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยากับ โลหะ ไวต่อการกระแทกและการเสียดสี พีอีทีเอ็น มี 3 ชนิด ชนิด A (เป็นผลึก) ชนิด B (เป็นผงละเอียด) และชนิด N (เป็นผงละเอียดมาก) พีอีทีเอ็นเป็นสารระเบิดที่มีพลังมาก ใช้ในดีโตเนเตอร์ (Detonators) ชนวนดีโตเนทิง(Detonating fuse) และในระเบิดพลาสติก (Plastic explosives) ในทางเภสัชกรรมก็ใช้ พีอีทีเอ็น ด้วย เพื่อรักษาโรคความดันสูง

ซ. ไนโตรกลีเซอรีน (Nitroglycerine) เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ไวต่อการกระแทก ความเร็วในการแตกตัว 7,700 เมตรต่อวินาที ใช้ในการทำระเบิดไดนาไมท์, ลูกระเบิดขว้าง และดินขับ มีความเป็นพิษ ทำให้เส้นเลือดพอง

ฌ. ระเบิดไดนาไมท์ (Dynamite explosives) ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ไนโตรกลีเซอรีน และไนโตรเซลลูโลส เมื่อสัดส่วนของไนโตรกลีเซอรีนสูง จะไวต่อความเย็น (ต่ำกว่า 8 องศาเซลเซียส) ระเบิดไดนาไมท์มีความเร็วในการแตกตัวทั้งแบบสูงและต่ำขึ้นกับพลังของดินเริ่มที่มาจุดความเร็วในการแตกตัวแบบต่ำ 2,000-3,000 เมตรต่อวินาที ความเร็วในการแตกตัวแบบสูง 6,500-7,500 เมตรต่อวินาที

ญ. ระเบิดพลาสติก (Plastic explosive) ในฝรั่งเศสใช้ พีอีพีเอ็น (PEPN) เป็นส่วนผสมสำคัญ แต่ในอเมริกาใช้เฮกโซเจน (Hexogen) เป็นส่วนผสมสำคัญ

ฎ. การผสมสารระเบิด (Explosive mixtures) ใช้ทีเอ็นที (TNT) ผสมกับสารระเบิดชนิดอื่น เพื่อช่วยให้ความไวในการกระแทกและเสียดสีน้อยลง ส่วนผสมที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้

- เพ็นโตไลท์ (Pentolites) เกิดจากการผสมระหว่าง พีอีทีเอ็น (PETN) กับ ทีเอ็นที อัตราส่วน 20:80 จะได้ความเร็วในการแตกตัว 5,600 เมตรต่อวินาที อัตราส่วน 50:50 จะได้ความเร็วในการแตกตัว 4,600-7,500 เมตรต่อวินาที

- เฮกโซไลท์ (Hexolites) เกิดจากการผสมระหว่าง เฮกโซเจน กับ ทีเอ็นที

50:50 (ความเร็วในการแตกตัว 6,200-7,400 เมตรต่อวินาที)

60:40 (ความเร็วในการแตกตัว 6,300-7,800 เมตรต่อวินาที)

70:30 (ความเร็วในการแตกตัว 6,400-8,000 เมตรต่อนาที)

90:10 (ความเร็วในการแตกตัว 6,400-8,200 เมตรต่อวินาที)

- ออกโตไลท์ (Octolites) เกิดจากการผสมระหว่างออกโตเจน 75% กับ พีเอ็นที 25%

ฏ. การผสมขี้ผึ้งหรือพาราฟินในสารระเบิด (Waxed explosive) เพื่อลดอันตรายจากการระเบิดให้น้อยลง มีการผสมหลายสูตร เช่น

- เฮกโตรเจนชนิด B 98% ขี้ผึ้ง 2% กราไฟท์ 1% ความเร็วในการแตกตัว 6,050 เมตรต่อวินาที

- เฮกโตรเจนชนิด B 91% ขี้ผึ้ง 3-9%

- พีอีทีเอ็น 90%, ขี้ผึ้ง 10% ความเร็วในการแตกตัว 6,890 เมตรต่อวินาที

- ออกโตเจน กับ ขี้ผึ้ง

ฐ. การผสมอลูมิเนียมในสารระเบิด (Aluminized Explosives) เพื่อเพิ่มพลังของการระเบิด เพิ่มอุณหภูมิของกาซที่เกิดขึ้น และเพิ่มความไวต่อการกระแทกและเสียดสี มีการผสมหลายสูตร เช่น

- เฮกเซล 17 (Hexal 17) ประกอบด้วย เฮกโซเจน ชนิด B 78% ขี้ผึ้ง 4% กราไฟท์ 1% และ อลูมิเนียม 17%

- เฮกเซล 30 (Hexal 30) ประกอบด้วย เฮกโซเจน 65% ขี้ผึ้ง 4% กราไฟท์ 1% และ อลูมิเนียม 30%

- เฮกโซไลท์ ผสมกับ อลูมิเนียม

- ออกเทล (Octal) ประกอบด้วย ออกโทเจน ผสมกับ อลูมิเนียม

1.2.2 วัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อยที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial explosives) เป็นการนำเอาวัตถุระเบิดแรงสูงที่มีความไวน้อยมาใช้ประโยชน์ เช่น ระเบิดหิน, ใช้ในงานเกษตรกรรม, งานก่อสร้าง, งานหลอมโลหะ เป็นต้น

2. ดินขับ (Propellant) เป็นสารระเบิดที่มีความเร็วในการแตกตัวแบบการเผาไหม้แบบความร้อนสูง (Deflagration) คงที่ ส่วนมากใช้ในอาวุธปืน และจรวดขับเคลื่อน แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ ดินขับจรวด (Rocket propellant) ดินส่งกระสุน (Gun powder) และดินดำ (Black powder)

2.1 ดินขับจรวด (Rocket propellant) อาจประกอบดินขับหนึ่งอัน หรือหลาย ๆ อันเข้าด้วยกัน ส่วนมากจะอยู่ในของแข็ง ใช้ผลักดันจรวดให้เคลื่อนที่ แบ่งได้เป็นหลายชนิด ได้แก่ ชนิดฐานคู่ (Double base) ชนิดคอมโพสิท(Composite) ชนิดเชื้อเพลิงของเหลว

2.2 ดินส่งกระสุน (Gun powder) อยู่ในรูปของของแข็ง ใช้ขับเคลื่อนกระสุนปืน อาจอยู่ในรูปของผง แท่งทรงกลม แท่งทรงกระบอก แบ่งได้เป็นหลายชนิด ได้แก่ ชนิดฐานเดี่ยว (Single-base powder) ส่วนประกอบสำคัญคือไนโตรเซลลูโลส ชนิดฐานคู่ (Double-base powder) ส่วนประกอบสำคัญ คือ ไนโตรเซลลูโลส และไนโตรกลีเซอรีน และชนิดมัลติเบสพาวเดอร์(Multibase powder) จะประกอบด้วยสารระเบิดมากกว่าหนึ่งชนิด

2.3 ดินดำ (Black powder) ประกอบด้วย โปตัสเซียมไนเตรด, ซัลเฟอร์ และถ่าน อาจใช้ในรูปของผง หรือในรูปที่อัดแล้วก็ได้

3. ส่วนผสมไพโรเทคนิค (Pyrotechnic composition) จะมีอัตราการแตกตัวเป็นแบบการเผาไหม้แบบธรรมดา (Combustion) มีหลายประเภทซึ่งจะกล่าวละเอียดในหัวข้อถัดไป คือ

3.1 ส่วนผสมให้แสงสว่าง (Flare composition)

3.2 ส่วนผสมให้ควัน (Smoke composition)

3.3 ส่วนผสมให้เสียง (Sound composition)

3.4 ส่วนผสมจุดตัว (Ignition composition)

3.5 ส่วนผสมให้ความร้อน (Thermal composition)

3.6 ส่วนผสมถ่วงเวลา (Delay composition)

3.7 ส่วนผสมให้กาซ (Gas composition)

3.8 ส่วนผสมอื่น ๆ (Other composition)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**หลักการเคมีเบื้องต้นทางไพโรเทคนิค**

ปฏิกิริยาเคมีของไพโรเทคนิคเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่น-รีดักชั่น (Oxido-reduction) :ซึ่งเป็นการถ่ายเทอิเลคตรอนระหว่างอะตอม อิเลคตรอนที่แลกเปลี่ยนเรียกว่า อิออน อะตอมที่สูญเสียอิเลคตรอนจะถูกออกซิไดซ์ อะตอมที่รับอิเลตตรอนจะถูกรีดิวส์ สสารโดยทั่วไปมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง

$$\Sigma \oplus = \Sigma \ominus$$

ประจุบวก=ประจุลบ

ตัวอย่างเช่น $Na^+, Cl^-, Hg^{2+}, O^{2-}$ โดยที่ $Na^{2+}$ เรียกว่า ประจุไฟฟ้าบวก และ$Cl^-$ เรียกว่าประจุไฟฟ้าลบ ประจุไฟฟ้าบวกสามารถสูญเสียอิเลคตรอนหนึ่ง สองหรือสาม อิเลคตรอนได้โดยง่าย กลายเป็น แอนอิออน (Anions) ส่วนประจุไฟฟ้าลบสามารถรับอิเลคตรอนหนึ่ง สองหรือ สาม อิเลคตรอนได้โดยง่าย กลายเป็นแคทอิออน (Cations) ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น-รีดักชั่น จะประกอบด้วยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

1. การทรานซิชั่นของโลหะไปเป็นอิออน (Metal oxidation)

$$Cu \rightarrow Cu_{aq}^{2+} + 2\bar{e}$$

ในปฏิกิริยานี้คอปเปอร์ถูกออกซิไดซ์ เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชั่น คือการสูญเสียหนึ่งหรือหลายอิเลคตรอน สารที่สามารถสูญเสียหนึ่งหรือหลายอิเลคตรอน เรียกว่า ตัวรีดิวส์ (Reducing agent) เพราะฉะนั้น โลหะคือตัวรีดิวส์

2. การทรานซิชั่นของอิออนของโลหะ (Reduction of metalic ion)

$Cu^{2+} + 2\bar{e} \rightarrow Cu \rightarrow$ อะตอมของโลหะทองแดงเกาะบนแผ่นสังกะสี

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยารีดักชั่น คือการรับหนึ่งหรือหลายอิเลคตรอน สารที่สามารถจับหนึ่งหรือหลายอิเลคตรอนเรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) สรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$Cu^{2+} + 2\bar{e} \Leftrightarrow Cu$$

(ตัวออกซิไดซ์ + $n\bar{e} \Leftrightarrow$ ตัวรีดิวซ์)

$Cu^{2+} / Cu$ เรียกว่า คู่ออกซิไดซ์/รีดิวซ์ (Oxidizing/ reducing couple)

ตัวอย่างปฏิกิริยาออกซิโดรีดักชั่น

$Cu^{2+} + 2\bar{e} \rightarrow Cu$ ปฏิกิริยารีดักชั่น

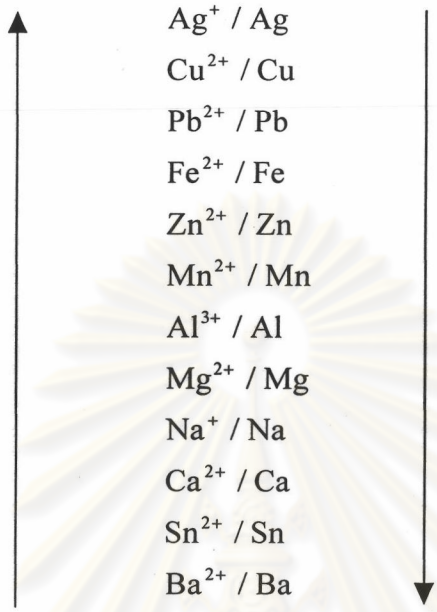
(ตัวออกซิไดซ์) ↓

$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\bar{e}$ ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น

(ตัวรีดิวส์)

การจัดจำพวก เซลไฟฟ้าเคมี (Electrochemical classification)

ตัวออกซิไดซ์ที่ดี




ตัวรีดิวซ์ที่ดี

ในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของสารไพโรเทคนิค ต้องทำให้เกิดสมดุลย์ทางเคมีของส่วนผสมไพโรเทคนิค โดยใช้สมการสลายตัวของออกซิไดเซอร์ (1) กับสมการออกซิเดชั่นของรีดิวเซอร์ (2) และคำนวณน้ำหนักของธาตุต่าง ๆ (Stoichiometry) และสมดุลย์ออกซิเจน (Oxygen balance) ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมกับแบเรียมไนเตรท

(1) $Ba(NO_3)_2 \rightarrow BaO + \frac{5}{2}O_2 + N_2$

(2 $Mg + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MgO$

(1)+(2) $Ba(NO_3)_2 + 5Mg \rightarrow 5MgO + BaO + N_2$

ออกซิเจนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา = ออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยา

การคำนวณค่า K และ n เพื่อใช้สำหรับจัดประเภทของส่วนผสมไพโรเทคนิค

K = ค่าสัมประสิทธิ์รีดิวเซอร์ออกซิเดชั่น

$$K = \frac{\text{จำนวนออกซิเจนอะตอมที่ให้ออกมาจากออกซิไดเซอร์}}{\text{จำนวนออกซิเจนอะตอมที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์รีดิวเซอร์}}$$

สำหรับส่วนผสมแสงสว่าง (Flare composition) ควรมีค่า K อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.7

n = น้ำหนักของออกซิเจนที่ให้ออกมาจากออกซิไดเซอร์ - น้ำหนักของออกซิเจนที่ใช้

ปฏิกิริยาเคมีของสารผสมออกซิไดเซอร์ และรีดิวเซอร์จะเกิดขึ้นได้เองหรือไม่ และใช้เวลานานเท่าไหร่สำหรับเกิดปฏิกิริยาจนสมบูรณ์ ต้องศึกษาข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังนี้

1. พลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy) $\Delta Gp,T$

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S; \Delta H$ คือเอนทาลปี

T คืออุณหภูมิของระบบหน่วยองศาเคลวิน

$\Delta S$ คือเอนโทรปี

ถ้า$\Delta G < 0$ โอกาสที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เองมีแนวโน้มสูง

$$A + B \rightarrow C + D$$

สารตั้งต้น สารผลิตภัณฑ์

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

เมื่อ $\Delta H < 0$ ปฏิกิริยาเป็นแบบปฏิกิริยาคายความร้อน มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา

เมื่อ $\Delta H > 0$ ปฏิกริยาเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน มีการดูดกลืนพลังงาน

อัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของระบบที่เพิ่มขึ้น ตามกฎของอาร์ฮีเนียสดังสมการต่อไปนี้

$$K = Ae^{\frac{-Ea}{RT}}$$

*K* คืออัตราเร็วของปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T เคลวิน

*A* คือ ค่าคงที่

*Ea* คือค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกริยา

*R* คือค่าคงที่ของก๊าซในอุดมคติ

*T* คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

2. อัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้น (Activation energy)

ตัวอย่างเช่น ไม้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ $\Delta G << 0$ แต่ปฏิกิริยา เกิดช้ามากเพราะพลังงานกระตุ้นสูง

$$Wood + O_2 \rightarrow Co_2 + H_2O$$

นอกจากนี้ อัตราของปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับสถานะของสสารที่แต่ละชิ้นของปฏิกิริยา

ของแข็ง ——> ของเหลว (อุณหภูมิหลอมเหลว) ——> ไอ (อุณหภูมิจุดเดือด)

ปริมาตรของสารละลายหรือปริมาตรของของเหลว << ปริมาตรของก๊าซ

ปริมาตรของก๊าซ >> ปริมาตรของของแข็งหรือของเหลว

$$V_{gas} = \frac{nRT}{P}$$

*V* คือ ปริมาตรในหน่วยลิตร

*n* คือ จำนวนโมลของก๊าซ

*R* คือ ค่าคงที่ของก๊าซ = 0.08211 Atm/ C.mol

*T* คือ อุณหภูมิองศาเคลวิน

*P* คือ ความดัน ในหน่วย Atm

อิทธิพลของคุณสมบัติทางฟิสิกส์-เคมี ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่

1. ความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของส่วนผสม เป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดในไพโรเทคนิค

2. ตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ขนาด (Granulometry) ขนาดยิ่งเล็กอัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้น เพราะฉะนั้นสามารถควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้โดยการเลือกขนาดของสาร ตัวอย่างเช่น ค่าเฉลี่ยขนาดของแมกนีเซียมในส่วนผสมแสงสว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยา

| (ไมโครเมตร) | ซม./นาที |
|---|---|
| 450 | 8 |
| 350 | 9 |
| 150 | 15 |
| 110 | 18 |

พื้นที่ผิวเฉพาะ (Specific surface area) ทรงกลมที่มีรูพรุน หรือสารที่เป็นอสัณฐานที่มีเส้นผ้าศูนย์กลาง D จะมีพื้นที่ผิว (Sp) มากกว่าสารที่มีลักษณะเป็นทรงกลมเรียบหรือผลึกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากัน (*Sc*)

$$Sp >> Sc$$

เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นบนพื้นที่ผิวของสาร สารที่มีพื้นที่ผิวเฉพาะมากขึ้นจะมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงขึ้น

ความชื้น (Humidity) การใช้น้ำในไพโรเทคนิคต้องถูกจำกัด การควบคุมอัตราของสารระเหยในวัตถุดิบเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เพราะฉะนั้นน้ำต้องถูกกำจัดออกไปโดยทำให้แห้ง ถ้าใช้ในการทำให้ส่วนผสมขนาดเล็กลง

ความบริสุทธิ์ (Purity) วัตถุดิบต้องบริสุทธิ์เท่าที่จะเป็นไปได้ โดยทราบชนิดของความบริสุทธิ์ของสาร เช่น ทราบปริมาณของสารไม่บริสุทธิ์ที่มีอยู่ในผงของสารหรือปริมาณสารละลายที่ใช้ ผลของคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี สรุปได้ดังนี้ เมื่อขนาดของสารลดลง อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวเฉพาะเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความชื้นเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาลดลงอาจเกิดอันตราย เช่น น้ำไม่สามารถใช้รวมกับแมกนีเซียมได้ ความบริสุทธิ์ลดลง ความเสี่ยงของการไม่เข้ากันทางเคมีระหว่างสารไม่บริสุทธิ์ และส่วนประกอบอื่น ๆ

**ส่วนผสมไพโรเทคนิค (Pyrotechnic composition)**

ส่วนผสมไพโรเทคนิค ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ๆ คือสารให้ออกซิเจน (Oxidizer) สารเชื้อเพลิง (Reducer) และสารช่วยในการเกาะยึด (Binder agent)

1. สารให้ออกซิเจน (Oxidizer) ในการเผาไหม้ธรรมดาต้องใช้ออกซิเจนซึ่งได้จากอากาศ แต่ในการเกิดปฏิกิริยาไพโรเทคนิคปริมาณออกซิเจนจากอากาศอย่างเดียวไม่เพียงพอต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนบางส่วนหรือทั้งหมดจากสารให้ออกซิเจนด้วย คุณสมบัติของสารให้ออกซิเจน คือ

- มีปริมาณออกซิเจนสูงสุด
- ให้ออกซิเจนได้ง่ายในระหว่างการเผาไหม้ (Combustion)
- มีความเสถียรที่อุณหภูมิระหว่าง -60 ถึง +60 องศาเซลเซียส
- ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ
- ไม่ดูดความชื้นหรือดูดความชื้นเพียงเล็กน้อย เพื่อประโยชน์ในการเก็บ

สารให้ออกซิเจน ที่ใช้กับเป็นหลักได้แก่ โปตัสเซียมไนเตรด ($KNO_3$), โปตัสเซียมคลอเรต ($KClO_3$), โปตัสเซียมเปอร์คลอเรต ($KClO_4$) และอัมโมเนียมเปอร์คลอเรต ($NH_4ClO_4$)

1.1 โปตัสเซียมไนเตรด ($KNO_3$) มีจุดหลอมเหลว 339 องศาเซลเซียส โปตัสเซียมไนเตรด 1 กรัมจะให้กาซออกซิเจน 0.158 กรัม หรือถ้ามีแมกนีเซียม (Mg) หรือซัลเฟอร์ (S) จะให้กาซออกซิเจนมากถึง 0.396 กรัม ปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นดังนี้

$$KNO_3 \rightarrow KNO_2 + O_2 - 58.5Kcal$$

คุณสมบัติของโปตัสเซียมไนเตรดได้แก่

- ให้กาซออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง
- ไม่ระเบิดด้วยตัวเอง, ไม่เป็นพิษ
- ง่ายในการผลิต
- ดูดความชื้นเล็กน้อย
- ผลิตภัณฑ์ที่มีโปตัสเซียมไนเตรดเป็นองค์ประกอบ จะมีคุณภาพสูง มีมาตรฐาน

1.2 โปตัสเซียมคลอเรต ($KClO_3$) มีจุดหลอมเหลว 368 องศาเซลเซียส โปตัสเซียมคลอเรต 1 กรัม จะให้กาซออกซิเจน 0.392 กรัม ปฏิกิริยาการแตกตัว มี 2 สมการ ณ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส ดังนี้

500 องศาเซลเซียส, $KClO_3 \rightarrow KCl + 3O_2 + 21.3Kcal$

600 องศาเซลเซียส, $KClO_3 \rightarrow K_2O + Cl_2 + \frac{5}{2}O_2 + 100.CKcal$

คุณสมบัติของโปตัสเซียมคลอเรต ได้แก่

- ดูดความชื้น
- ระเบิดได้ด้วยตัวเอง ถ้ามีประกายไฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ทำปฏิกิริยากับฟลสฟอรัส (P) และซัลเฟอร์ (S)

- ง่ายในการผลิต

1.3 โปตัสเซียมเปอร์คลอเรต ($KClO_4$) มีจุดหลอมเหลว 570 องศาเซลเซียส ของโปตัสเซียมเปอร์คลอเรต 1 กรัม จะให้กาซออกซิเจน 0.462 กรัม ปฏิกิริยาการแตกตัว เป็นดังนี้

$$KClO_4 \rightarrow KCl + 2O_2 + 0.68Kcal$$

คุณสมบัติของโปตัสเซียมเปอร์คลอเรต ได้แก่

- ให้กาซออกซิเจนสูง มากกว่า โปตัสเซียมไนเตรด

- ระเบิดได้ด้วยตัวเอง ถ้าเกิดประกายไฟ

- ทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และแอนติโมนีไตรซัลเฟอร์ ($Sb_2S_3$)

- มีความไวน้อยกว่า โปตัสเซียมคลอเรต

การผลิตโปตัสเซียมเปอร์คลอเรต ทำได้ 2 วิธี คือ วิธีที่ 1

$$NaClO_3 + H_2O \rightarrow NaClO_4 + H_2$$

วิธีนี้ได้กาซไฮโดรเจนซึ่งอันตราย จึงไม่ค่อยใช้ ส่วนใหญ่จะใช้วิธีที่ 2 คือ

$$NaClO_4 + KCl \rightarrow KClO_4 + NaCl$$

1.4 อัมโมเนียมเปอร์คลอเรต ($NH_4ClO_4$) ไม่มีจุดหลอมเหลวเพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการแตกตัว (Decomposition) ปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นดังนี้

$$NH_4ClO_4 \rightarrow N_2 + 3H_2O + 2HCl + 2.5O_2$$

คุณสมบัติของอัมโมเนียมเปอร์คลอเรต ได้แก่

- มีอุณหภูมิที่จะเกิดการแตกตัว (Decomposition temperature) ที่ 260 องศาเซลเซียส ถึง 360 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับสารเชื้อเพลิง (Reducer) ที่ใช้

- มีความไวต่อสารเจือปน

- ระเบิดถ้าผสมกับโปตัสเซียมคลอเรต ($KClO_3$)

สารให้ออกซิเจนยังมีอีก 2 ชนิด ได้แก่ สารให้ออกซิเจนที่ทำให้เกิดสี (Color-producing oxidizer) และสารให้ออกซิเจนที่ให้คลอรีนด้วย (Chlorine-producing agent)

ในผลิตภัณฑ์ไพโรเทคนิคบางชนิดที่ต้องการผลทางด้านสี จะใช้ประโยชน์จากสารให้ออกซิเจนที่ทำให้เกิดสี หมายความว่า เป็นสารที่เป็นทั้งตัวให้ออกซิเจน และเป็นตัวทำให้เกิดสีได้ในเวลาเดียวกัน สารประเภทนี้ได้แก่เกลือของโลหะเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเกลือของโลหะระเบิดกลายเป็นไอ อะตอมจะไปอยู่ในสถานะตื่นตัว (Excited state) และเมื่ออะตอมกลับมาอยู่ในสภาวะปกติ (Ground state) จะปลดปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กันขึ้นกับชนิดของเกลือของโลหะ ทำให้เป็นสีต่าง ๆ เกลือของโลหะที่ใช้ในการทำให้เกิดสีต่าง ๆ มีดังนี้

- สีแดง ได้จาก สตรอนเทียมไนเตรด ($Sr(NO_3)_2$) สตรอนเทียมคาร์บอเนต ($SrCO_3$) และสตรอนเทียมออกซาเลต ($SrC_2O_4.H_2O$) ส่วนใหญ่จะใช้สตรอนเทียมไนเตรด สตรอนเทียมออกซาเลตไม่ค่อยใช้เพราะว่ามีโมเลกุลของน้ำอยู่ ถ้าโมเลกุลของน้ำหลุดออกไป อาจจะไปทำปฏิกิริยากับสารชนิดอื่นได้

- สีเขียว ได้จาก แบเรียมไนเตรด (($Ba(NO_3)_2$)แบเรียมคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และแบเรียมออกซาเลต ($BaC_2O_4$) ส่วนใหญ่จะใช้แบเรียมไนเตรด แบเรียมคาร์บอเนตยากที่จะแตกตัว ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก

- สีน้ำเงิน ได้จาก คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) และคอปเปอร์ออกซิคลอเรต ($CuO.CuSO_4$)

- สีเหลือง ได้จาก โซเดียมออกซาเลต ($Na_2C_2O_4$) และโซเดียมคาร์บอเนต ($Na_2CO_3.H_2O$)

- สีส้ม ได้จาก แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)

สารให้ออกซิเจน ประเภทสุดท้าย คือสารให้ออกซิเจนที่ให้คลอรีนด้วย ประโยชน์ของสารประเภทนี้คือเป็นแหล่งของคลอรีนในส่วนผสมเพื่อทำหน้าที่ ทำให้สีเข้มขึ้น ประโยชน์อีกอย่างคือเป็นแหล่งของคลอรีนในสารช่วยยึดเกาะ (Binding agent) เพราะสารยึดเกาะส่วนใหญ่เป็นพวกโมเลกุลออแกนิก ที่มีอะตอมของคลอรีน ตัวอย่างของสารให้ออกซิเจนที่ให้คลอรีนด้วย ได้แก่ โพลีเอทิลีน คลอไรด์ และโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)

2. สารเชื้อเพลิง (Reducer) ทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงในขณะเกิดการเผาไหม้ สารเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติดังนี้

- สามารถเผาไหม้ได้โดยใช้ออกซิเจนปริมาณน้อยที่สุด
- ออกซิไดส์ได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับสารให้ออกซิเจนหรือออกซิเจนในอากาศ
- มีความเสถียรที่อุณหภูมิ ระหว่าง -60 C และ +60 C
- ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดต่าง ๆ
- ไม่ดูดความชื้น

สารเชื้อเพลิง มี 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่เป็นสารออแกนิก (Organic) และชนิดที่เป็นสารอินออแกนิก (Inorganic) สารเชื้อเพลิงที่เป็นสารออแกนิก ได้แก่ แลกโตส (Lactose) ฟรุกโตส (Fructose) แป้ง (Starch) น้ำมัน (Oil) ผงสี (Dyes and pigments) สารชนิดนี้จัดว่าเป็นสารให้ออกซิเจนระดับที่ 2 เนื่องจากให้ออกซิเจนได้ยาก เผาไหม้ได้ยาก และต้องผสมกับสารให้ออกซิเจน เช่น โปตัสเซียมคลอเรต สารเชื้อเพลิงที่เป็นสารอินออแกนิก ได้แก่ผงโลหะต่างๆ ซึ่งจัดว่าเป็นสารเชื้อเพลิงที่แท้จริง

2.1 แลกโตส (Lactose) สูตรโมเลกุล $C_{12}H_{22}O_{11}.H_2O$ น้ำหนักโมเลกุล 360 กรัม จุดหลอมเหลว 222.8 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำจะหลุดไป ให้พลังงาน

651 กิโลแคลเลอรีต่อกรัม ใช้ในส่วนผสมให้ควัน (Smoke composition) ข้อควรระวังในการใช้คือ ห้ามผสมกับคลอเรตโดยตรงเพราะจะเกิดการระเบิดขึ้นได้

2.2 แป้ง (Starch) สูตรโมเลกุล $(C_6H_{10}O_5)_n$ น้ำหนักโมเลกุล 162 กรัม ให้พลังงาน 1.55 กิโลแคลเลอรีต่อกรัม ใช้ในส่วนผสมให้ควัน (Smoke composition) และดอกไม้ไฟ (Fireworks) แป้งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำในสภาวะที่เป็นกรด จะได้กลูโคส (Glucose)

$$(C_6H_{10}O_5)_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6 \quad \text{(2-glucose)}$$

2.3 ผงสี (Dyes and pigments) ใช้ในการทำควันสีต่าง ๆ ซึ่งแต่ละสีจะมีชื่อทางเคมี น้ำหนักโมเลกุลและจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน เช่น สีแดงใช้ 1 (Methylamine) Anthraquinone น้ำหนักโมเลกุล 237.3 กรัม จุดหลอมเหลว 165 - 175 องศาเซลเซียส สีส้มใช้ 1 Amino 2 Methylanthraquinone น้ำหนักโมเลกุล 237.2 กรัม จุดหลอมเหลว 190 - 202 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ทำให้ผงสีเกิดการระเหิดมีค่าประมาณ 230 - 250 องศาเซลเซียส

2.4 ผงโลหะ (Metal powders) แบ่งเป็น 2 ชนิด คือชนิดที่เป็นโลหะจริง ๆ (Al, Mg, Zn, Al-Mg, Si-Al, Fe-Si) และประเภทเมทอลลอยด์ (Metaloids) เช่น $P, S, C, Si_2Ca$

ก. อลูมิเนียม (Aluminium) เป็นผงที่ใช้มากในส่วนผสมไพโรเทคนิค ให้พลังงานความร้อนสูงถึง 393 น้ำหนักอะตอม 26.982 กรัม ความหนาแน่น 2.699 (ผลึก) จุดหลอมเหลว 660 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2270 องศาเซลเซียส ประโยชน์ของอลูมิเนียม คือ มีความเสถียรในอากาศเนื่องจากการก่อตัว เป็นชั้นของ $Al_2O_3$ บนผิวอลูมิเนียม นอกจากนี้ยังมีความเสถียรในน้ำหรือกรดที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการก่อตัวเป็นชั้นของ $Al(OH)_3$ บนผิวอลูมิเนียม แต่ถ้าอยู่ในน้ำหรือกรด หลายชั่วโมง ชั้นของ $Al(OH)_3$ จะแตก และอาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงขึ้นได้ ข้อเสียของอลูมิเนียม คือสึกกร่อนได้ง่ายถ้าสัมผัสกับสารอัลคาไลน์ (Alkaline substances) ทำปฏิกิริยากับไนเตรด เมื่อมีน้ำอยู่ทำให้เกิด $H_2$, $NH_3$ และ $NO_x$ ดังนั้นจึงไม่ควรใช้อลูมิเนียมร่วมกับโปตัสเซียมไนเตรด สตรอนเทียมไนเตรด แบเรียมไนเตรด หรือโซเดียมไนเตรด ยกเว้น อัมโมเนียมเปอร์คลอเรต

ข. แมกนีเซียม (Magnesium) น้ำหนักอะตอม 24.312 กรัม, ความหนาแน่น 1.74 จุดหลอมเหลว 650 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1107 องศาเซลเซียส ให้พลังงานความร้อน 166 กิโลแคลเลอรีต่อกรัมโมล ข้อดีของแมกนีเซียมคือ

- จุดเดือดของแมกนีเซียมมีค่าน้อยกว่า จุดเดือดของอลูมิเนียม แมกนีเซียมจึงระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอลูมิเนียม ดังนั้นจึงลุกไหม้ได้ง่ายกว่าอลูมิเนียม
- ให้สีของเปลวไฟได้ เมื่อใช้ร่วมกับสารให้ออกซิเจนเพียงชนิดเดียว เช่น ไนเตรด เป็นลักษณะเฉพาะของแมกนีเซียม
- ในระหว่างการทำปฏิกิริยา ถ้าปริมาณออกซิเจนของสารให้ออกซิเจนไม่เพียงพอ แมกนีเซียมก็มีความสามารถในการนำเอาออกซิเจนจากอากาศมาใช้ได้

- ไม่ทำปฏิกิริยาหรือทำปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยกับเบส

ข้อเสียของแมกนีเซียม

- ให้พลังงานน้อยกว่าอลูมิเนียม
- ทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น $Mg + 2H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$
- ทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด
- ทำปฏิกิริยารุนแรงกับอัมโมเนียมไนเตรด หรืออัมโมเนียมเปอร์คลอเรต เมื่อมีน้ำ
- ทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ ให้ $H_2S$

โดยทั่วไป เมื่อมีการใช้แมกนีเซียม จะต้องมีการเคลือบแมกนีเซียมด้วย น้ำมัน, พาราฟิน หรือ โปตัสเซียมไบโครเมต $(KCr_2O_7)$ หรือโพลีเอสเตอร์ (Polyester)

2.5 ผงคาร์บอเนต (Carbonated powders) สูตรโมเลกุล $C_{20}H_7O$ จัดเป็นคาร์บอนประเภทอสัญฐาน น้ำหนักโมเลกุล 263 กรัม ใช้เป็นส่วนผสมสำคัญในส่วนผสมช่วยจุดตัว (Ignition composition) ในดอกไม้ไฟ ช่วยเพิ่มความสว่างของเปลวไฟ

3. สารช่วยในการยึดเกาะ (Binders) ประโยชน์ของสารประเภทนี้ มีดังนี้

- ช่วยให้ง่ายในการผลิตส่วนผสมไพโรเทคนิค เช่นใช้เวลาในการจัดส่วนผสมเร็วขึ้น
- ช่วยให้อัดส่วนผสมบางชนิดได้ ส่วนผสมบางชนิดถ้าไม่มีสารช่วยในการยึดเกาะจะไม่สามารถอัดได้เลยไม่ว่าจะใช้แรงอัดมากเท่าไร ส่วนผสมก็จะยังคงสภาพเป็นผง
- เพื่อลดความไวของส่วนผสมที่มีต่อน้ำ
- เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของส่วนผสมเมื่ออัดแล้ว

คุณสมบัติของสารช่วยในการยึดเกาะมีดังนี้

- ต้องทำให้สารยึดเกาะกันได้อย่างแข็งแรง
- ต้องช่วยให้สารที่รวมตัวเข้าด้วยกันยากรวมตัวกันได้
- ต้องไม่มีผลต่อการอบหรือขึ้นรูปส่วนผสม
- ต้องไม่ทำให้ส่วนผสมเกิดเป็นโพรงเมื่ออบให้แห้ง
- การละลายกับน้ำหรือสารละลายได้แม้ในอุณหภูมิที่เย็น
- ไม่ทำให้ส่วนผสมเสื่อมสภาพเมื่อเก็บนาน ๆ

ตัวอย่างของสารช่วยในการยึดเกาะ ได้แก่ กัมอารบิก (Gum arabic) อะคารอยเรซิน (Acaroid resin) แซลแลค (Shellac) เดกตริน (Dextrin) น้ำมัน (Standoil) น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Linseed oil) น้ำมันหล่อลื่น (Castor oil) และน้ำมันเครื่อง (Engine oil) เป็นต้น

3.1 กัม (Gum) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยางเหนียวของต้นไม้บางชนิด กัมอารบิก (Gum arabic) ได้จากเมล็ดสีดำ สีแดง หรือสีเหลืองของต้น Australian shrub นำมาผสมกับอัลกอฮอล์ หรือ

อะซีโตน (Alcohol or acetone) ใช้ในส่วนผสมให้ควัน (Smoke composition) หรือใช้ในผลิตภัณฑ์ของดอกไม้ไฟ (Fireworks) ผสมในส่วนผสมประมาณ 1-5 % ของส่วนผสมทั้งหมด

3.2 แชลแลค (Shellac) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของสารไฮโดรคาร์บอน สูตรโมเลกุล $C_{16}H_{24}O_5$ จุดหลอมเหลว 70-100 องศาเซลเซียส ใช้ผสมกับอัลลอยด์หรืออะซีโตน ใช้ในผลิตภัณฑ์พวกดอกไม้ไฟ ผสมในส่วนผสมประมาณ 1-15% ของส่วนผสมทั้งหมด

3.3 เดกตริน (Dextrin) เตรียมได้จากการให้ความร้อนและกรดแก่แป้ง เดกตรินมี 3 ประเภท คือ

- เดกตรินขาว (White dextrin) ไม่ละลายในน้ำ ส่วนใหญ่ใช้ในทางเภสัชกรรม ใช้ไม่มากในไพโรเทคนิค

- เดกตรินเหลือง (Yellow dextrin) ละลายได้ในน้ำ ใช้ในส่วนผสมให้แสงสว่าง (Flare composition) ของผลิตภัณฑ์พวกดอกไม้ไฟ

- เดกตรินหวาน (Sweet dextrin) ละลายได้ในน้ำ ใช้ในส่วนผสมให้แสงสว่างและให้ควัน (Flare and smoke composition)

3.4 น้ำมัน (Oil) ได้จาก 2 แหล่ง คือ จากพืช (Plant) และจากแร่ธาตุ (Mineral) ใช้ผสมในส่วนผสม 1-2 % ของส่วนผสมทั้งหมด ข้อดีของน้ำมัน คือ ไม่ละลายในน้ำจึงช่วยป้องกันส่วนผสมจากความเปียกชื้นได้ดี

3.5 แป้ง (Starch) สูตรโมเลกุล $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อละลายน้ำจะได้ของเหลวมีลักษณะเหมือนกาว ใช้ผสมในส่วนผสม 1-15% ของส่วนผสมทั้งหมด ใช้ในส่วนผสมให้ควัน (Smoke composition) เพื่อทำให้เวลาในการเผาไหม้คงที่

3.6 เรซิน (Resin) มี 3 ชนิด คือ พีโนลิก เรซิน (Phenolic resin) ใช้ในส่วนผสมให้แสงสว่าง (Flare composition) และดินขับ (Propellant) โพลีเอสเตอร์เรซิน (Polyester resin) ใช้ในส่วนผสมให้แสงสว่าง โพลียูเรเทนเรซิน (Poly urethane resin) ใช้ในส่วนผสมให้แสงสว่าง (Flare composition) และดินขับ (Propellant) เรซินทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการยึดเกาะและเป็นสารเชื้อเพลิงได้ด้วย ข้อควรระวังในการใช้เรซิน คือความเป็นพิษของเรซิน และเรซินไม่สามารถเข้ากันได้กับสารบางอย่าง

นอกจากสารให้ออกซิเจน (Oxidizer) สารเชื้อเพลิง (Reducer) และสารช่วยในการยึดเกาะ (Binder) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในส่วนผสมแล้ว ยังมีสารอื่น ๆ อีก คือ

- สารแอสเซอร์เรเตอร์ (Accelerator) เช่น สารออกาโนเมทัลลิก (Organometallic), เฟอร์โรเซนต์ และบิวทิลเฟอร์โรเซนต์ (Butyl ferrocene)

- สารโมเดอร์เรเตอร์ (Moderators) เช่น Kieselghur (เป็นฟอสซิล ชนิดหนึ่ง) ช่วยดูดความร้อน ในกรณีที่ความร้อนของปฏิกิริยามากเกินไป

**ประเภทของส่วนผสมไพโรเทคนิค**

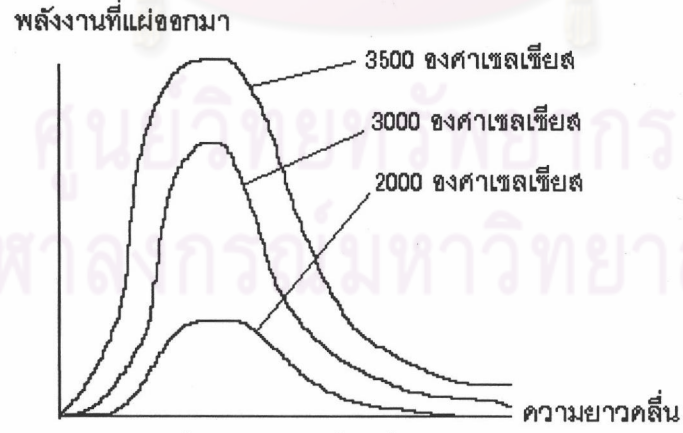
ส่วนผสมไพโรเทคนิค แบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

- ส่วนผสมให้แสงสว่าง (Flare composition)
- ส่วนผสมให้ควัน (Smoke composition)
- ส่วนผสมถ่วงเวลา และช่วยจุดตัว (Delay and ignition composition)
- ส่วนผสมผลักดัน (Propulsive composition)
- ส่วนผสมให้เสียง (Sound composition)

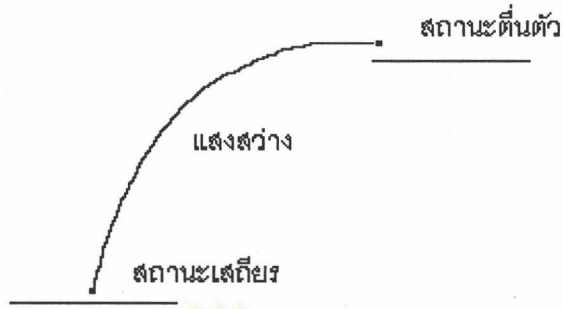
1. ส่วนผสมให้แสงสว่าง (Flare composition) เงื่อนไขพิเศษของส่วนผสมชนิดนี้ คือ

- ต้องให้พลังงานแสงสว่าง (Lumen/second) สูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และให้พลังงานความร้อนอย่างน้อย 1.5 กิโลแคลเลอรีต่อกรัม
- สเปกตรัมของแสงต้องใกล้เคียงกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์
- ต้องมีสัมประสิทธิ์ของแสงสว่าง (Luminous coefficient) สูง ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ปริมาณของอนุภาคของแข็ง หรืออนุภาคของเหลว และพื้นที่ผิวของการแผ่ (Radiation surface area)
- ความเร็วในการเผาไหม้ของส่วนผสมอยู่ในช่วงเป็นมิลลิเมตรต่อวินาที

แสงสว่างเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแข็งหรือของเหลวที่อุณหภูมิสูง (,มากกว่า 2000 องศาเซลเซียส) และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด การเตรียมส่วนผสมให้แสงสว่าง ต้องเลือกสารให้ออกซิเจน (Oxidizer) และสารเชื้อเพลิง (Reducer) ให้เหมาะสม ส่วนประกอบอื่น ๆ ควรมีไม่เกิน 10-15%




รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของโมเลกุล




รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของอิเลคตรอน

การเลือกสารให้ออกซิเจน มีหลักการอยู่ 2 ข้อ คือ

- เลือกสารที่ต้องการพลังงานน้อยที่สุดในการทำให้แตกตัว ตัวอย่างการเลือกเกลือของแบเรียม

ตารางที่ 2.1 ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายออกซิเจนของแบเรียม

| สารให้ออกซิเจน | ความร้อนที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายออกซิเจน 1 กรัมออกจากสารให้ออกซิเจน | เปอร์เซ็นต์ในส่วนผสม | ผลของความร้อน (กิโลแคลเลอรีต่อกรัม) |
|---|---|---|---|
| $Ba(ClO_4)_2$ | -0.04 | 37 | 2.2 |
| $Ba(ClO_3)_2.H_2O$ | +0.30 | 31 | 1.9 |
| $Ba(NO_3)_2$ | -1.20 | 32 | 1.7 |
| $Ba(NO_2)_3$ | -1.10 | 29 | 1.0 |
| $BaSO_4$ | -3.70 | 23 | 1.2 |
| $BaO_2$ | -0.70 | 13 | 0.7 |
| $BaCO_3$ | -4.80 | 20 | 0.6 |

- เลือกเกลือของโลหะที่มีออกซิเจนมาก

ตารางที่ 2.2 ปริมาณออกซิเจนของเกลือแบเรียม

| สารให้ออกซิเจน | มวลโมเลกุล (กรัม) | ปริมาณออกซิเจนที่ได้จากสารให้ออกซิเจน 100 กรัม | ปริมาณสารให้ออกซิเจนที่ให้ออกซิเจน 1 กรัม | ผล |
|---|---|---|---|---|
| $Ba(ClO_3)_2.H_2O$ | 322 | 30 g | 3.35 g | มีความไวมาก ไม่นิยมใช้ |
| $Ba(NO_3)_2$ | 261 | 30 g | 3.27 g | ดีที่สุด |
| $BaSO_4$ | 233 | 27 g | 3.64 g | |
| $BaO_2$ | 169 | 9 g | 10.59 g | ไม่ใช้ |
| $BaC_2O_4$ | 225 | 28.5 g | 3.51 g | |
| $BaCO_3$ | 197 | 24.5 g | 4.10 g | |

การเลือกสารเชื้อเพลิง (Reducer) มีหลักการอยู่ 3 ข้อ คือ

- เลือกสารเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนมากที่สุด โดยทั่วไปควรมากกว่า 2 กิโลแคลเลอรีต่อกรัม

ตารางที่ 2.3 ความร้อนที่ได้ต่อหนึ่งโมลของออกไซด์ของธาตุต่างๆ

| ธาตุ | ออกไซด์ของธาตุ | ความร้อนที่ได้ต่อหนึ่งโมลของออกไซด์ (กิโลแคลเลอรี) |
|---|---|---|
| *Be* | $BeO$ | 138 |
| *Al* | $Al_2O_3$ | 393 |
| *B* | $B_2O_3$ | 302 |
| *Li* | $Li_2O$ | 142 |
| *H* | $H_2O$ | 68 |
| *Mg* | $MgO$ | 146 |
| *Ca* | $CaO$ | 152 |
| *Si* | $SiO_2$ | 108 |
| *Ti* | $TiO_2$ | 218 |

จากตารางพบว่า Al ให้พลังงานความร้อนมากที่สุด

- เลือกสารเชื้อเพลิงที่ทำให้อุณหภูมิสูง เพื่อให้มีแต่อนุภาคของแข็ง และอนุภาคของเหลวเท่านั้นทำให้เห็นแสงสว่างได้ดีกว่าอนุภาคของกาซ อุณหภูมิควรสูงกว่า 2000 องศาเซลเซียส
- เลือกสารเชื้อเพลิงที่ให้ผลของความร้อน (Thermal effect) มากที่สุด

ตารางที่ 2.4 ผลของความร้อนของสารเชื้อเพลิง

| ธาตุ | เปอร์เซ็นต์ส่วนผสม | | ผลของความร้อน (กิโลแคลเลอรีต่อกรัม) |
|---|---|---|---|
| | สารเชื้อเพลิง | สารให้ออกซิเจน | |
| *Al* | 26 | 74 | 1.57 |
| *Mg* | 32 | 68 | 1.65 |
| *Ca* | 43 | 57 | 1.44 |
| *B* | 12 | 88 | 1.37 |
| *Si* | 21 | 79 | 1.28 |
| *Ti* | 31 | 69 | 1.18 |
| *V* | 28 | 72 | 0.94 |
| *Zr* | 46 | 54 | 1.12 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางพบว่า Al และ Mg ดีที่สุด Al จุดติดได้ง่ายกว่า Mg แต่ให้พลังงานน้อยกว่า ส่วน Mg จุดติดยากกว่า Al แต่ให้พลังงานมากกว่า

2. ส่วนผสมให้ควัน (Smoke comporition) ส่วนผสมชนิดนี้จะให้ควันออกมาเป็นจำนวนมากภายในระยะเวลาหนึ่ง การพิจารณาว่าลักษณะของควัน ดีหรือไม่ดูได้จาก ความหนาแน่นของควัน (Smoke density)ไม่มีเปลวไฟติดกับควัน มีเถ้า (Slag) ที่เกิดจากการเผาไหม้น้อย และน้ำหนักมาก การเตรียมส่วนผสมให้ควันมี 2 แบบ คือ แบบที่มีสารที่ทำให้เกิดควันอยู่แล้ว กับ แบบที่ไม่มีสารที่ทำให้เกิดควันอยู่แต่จะมีเมื่อเกิดการเผาไหม้

ส่วนผสมแบบที่มีสารทำให้เกิดควันอยู่แล้วมีลักษณะการทำงานดังนี้

รูปที่ 2.6 การทำงานของส่วนผสมที่มีสารทำให้เกิดควันอยู่แล้ว

สูตรส่วนผสมทั่วไปของส่วนผสมแบบนี้เป็นดังนี้

- สารให้ออกซิเจน ได้แก่ โปตัสเซียมคลอเรต
- สารเชื้อเพลิง ได้แก่สารให้ออกซิเจนระดับที่ 2 เช่น แลกโตส น้ำตาล
- สารให้ควัน ได้แก่ สารออแกนิก เช่น ผงสี

ลักษณะเฉพาะของส่วนผสมแบบนี้

- อุณหภูมิในการเผาไหม้ต่ำ โดยทั่วไปน้อยกว่า 500 องศาเซลเซียส
- อัตราการเผาไหม้ช้า
- ใช้หลักการระเหิดของสาร ในการทำให้เกิดควัน

ส่วนผสมแบบที่จะมีสารทำให้เกิดควัน เมื่อมีการเผาไหม้ มีลักษณะการทำงานดังนี้

รูปที่ 2.7 การทำงานของส่วนผสมแบบที่จะมีสารทำให้เกิดควัน

สูตรส่วนผสมทั่วไปของส่วนผสมแบบนี้ เป็นดังนี้

- สารให้ออกซิเจน ได้แก่ โปตัสเซียมคลอเรต อัมโมเนียมหรือโปตัสเซียมเปอร์คลอเรต อัมโมเนียมไนเตรด และเฮกซาคลอโรอีเทน

- สารเชื้อเพลิงแบบแรง ได้แก่ แคลเซียมซิลิไซด์ ($CaSi_2$) ถ่าน แมกนีเซียม อลูมิเนียม

- สารอื่น ๆ ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน แนพทาลีน อัมโมเนียมคลอไรด์ ซิงค์ออกไซด์ แอนทาเซน

ลักษณะเฉพาะของส่วนผสมแบบนี้ ได้แก่

- อุณหภูมิในการเผาไหม้สูง อยู่ในช่วง 600 องศาเซลเซียส ถึง 2000 องศาเซลเซียส
- อัตราการเผาไหม้สูง
- ใช้หลักการเผาไหม้ในการทำให้เกิดควัน
- มีการใช้ออกซิเจนจากอากาศด้วย
- มีโอกาสที่จะเกิดเปลวไฟ

ตัวอย่างสูตรส่วนผสมของส่วนผสมแบบที่มีสารทำให้เกิดควันอยู่แล้ว

- โปตัสเซียมคลอเรต 25%
- แลกโตส 25%
- ผงสีแดง (Red dye) 50%

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ

$$4KClO_3 + C_{12}H_{24}O_{12} \rightarrow 8KCl + 12Co_2 + 12H_2O + Heat$$

ตัวอย่างสูตรส่วนผสมของส่วนผสมแบบที่จะมีสารทำให้เกิดควัน เมื่อมีการเผาไหม้

- เฮกซาคลอโรอีเทน 59%
- แมกนีเซียม 18%
- แอนทาเซน 23%

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ

$$C_2Cl_6 + 3Mg + 0.65C_{10}H_8 + 1.3O_2(Air) \rightarrow 3MgCl_2 + 2.6H_2O + 8.5C$$

สารอื่น (Additives) ที่ควรใส่ในส่วนผสมให้ควันด้วย ได้แก่

1. สารที่ช่วยทำให้เย็น (Cooler) และสารที่ช่วยดับเปลวไฟ (Flame extinguisher) เช่น $NaHCo_3, MgCo_3, CaCo_3$

$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$$
$$NaHCO_3 \rightarrow \tfrac{1}{2} Na_2CO_3 + \tfrac{1}{2} CO_2 + \tfrac{1}{2} H_2O$$
$$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O + CO_2$$
$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คุณสมบัติสำคัญของสารอื่น ๆ ที่เติมลงไป คือทำให้อุณหภูมิการแตกตัวต่ำ ผลิตกาซคาร์บอนไดออกไซด์ $(CO_2)$ ซึ่งช่วยดับเปลวไฟ และทำให้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้มีน้อยและน้ำหนักเบา

2. สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อน ได้แก่ ซิลิก้า

3. สารทำให้ความเร็วการเผาไหม้คงที่ ได้แก่ พาราฟิน

ตารางต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของสูตรส่วนผสมที่ให้สีต่าง ๆ

ตารางที่ 2.5 สูตรส่วนผสมที่ให้สีต่างๆ

| ส่วนผสม | ควันสีเกิดขณะมีการเผาไหม้ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | แดง | | เหลือง | | เขียว | | น้ำเงิน | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Potassium chlorate | 30 | 35 | 30 | 34 | 34 | 35 | 25 | 35 | 30 |
| Lactose | | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 5 | 20 |
| Beet sugar | 28 | | | | | | | | |
| Para red | 31 | | | | | | | | |
| Rhodamine B | 11 | 40 | | | | | | | |
| Auramine | | | 40 | 41 | 27 | 12 | | | |
| Chrysoidine | | | 10 | | | | | | |
| Methylene blue | | | | | | | | 60 | |
| Indigo | | | | | 14 | 28 | | | |
| 1,4 Dimethylnitroanthraquinone | | | | | | | 50 | | |
| Sudan blue G | | | | | | | | | 50 |

3. ส่วนผสมช่วยในการจุดตัว (Ignition composition) มีจุดประสงค์เพื่อทำให้ส่วนผสมไพโรเทคนิคลุกติดไฟได้ ลักษณะที่ต้องคำนึงถึงของส่วนผสมช่วยในการจุดตัว คือต้องช่วยในการติดไฟภายใต้ความร้อนต่ำ การเตรียมส่วนผสมช่วยในการจุดตัว มีหลักดังนี้

- ใช้สารให้ออกซิเจนที่ปล่อยออกซิเจนได้ง่าย เช่น เปอร์มังกาเนต คลอเรต ไนเตรด (ส่วนใหญ่จะใช้โปตัสเซียมไนเตรด)

- ใช้สารเชื้อเพลิงที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย เช่น ถ่าน แอนติโมนี แมกนีเซียม ซัลเฟอร์

ตัวอย่างสูตรผสมของส่วนผสมช่วยในการจุดตัวสำหรับสัญญาณควัน

- ใช้โปตัสเซียมไนเตรด

- โปตัสเซียมไนเตรด 63%
- ซัลเฟอร์ 11%
- แอนติโมนี 11%
- ถ่าน 11%

- ใช้โปตัสเซียมคลอเรต
  - โปตัสเซียมคลอเรต 35%
  - แลกโตส 25%
  - ถ่าน 15%
  - เดกตริน 6%
  - แอตติโมนี 5%
- ใช้ดินดำ (Black powder)
  - โปตัสเซียมไนเตรด 75%
  - ถ่าน 15%
  - ซัลเฟอร์ 10%

ตัวอย่างสูตรส่วนผสมช่วยในการจุดตัวเพื่อต้องการพลังงานมากขึ้น โดยใช้สารเชื้อเพลิงที่มีพลังมาก

- โปตัสเซียมไนเตรด 75%
- แมกนีเซียม 15%
- แชลแลก 10%

ตัวอย่างสูตรส่วนผสมช่วยในการจุดตัวทำงานแบบใช้การขัดสี (Friction)

- โปตัสเซียมคลอเรต 63%
- แอนติโมนี 30%
- เรซิน 7%

4. ส่วนผสมถ่วงเวลา (Delay composition) มีจุดประสงค์เพื่อให้มีช่วงเวลา ระหว่างการจุดตัวและผลที่ต้องการให้เกิดขึ้น ส่วนผสมถ่วงเวลาแบบเก่าที่สุดใช้การอัดดินดำลงในท่อกระดาษ กฎที่ต้องคำนึงถึงของส่วนผสมถ่วงเวลาได้แก่

- ส่วนผสมที่มีอัตราการเผาไหม้เร็ว จะให้ความร้อนสูงด้วย
- อัตราการเผาไหม้ และความไวของการจุดตัวขึ้นกับชนิดของสารให้ออกซิเจนที่ใช้
- คุณภาพ ขนาดอนุภาคของส่วนผสม สารเจือปน มีผลโดยตรงกับความคงที่ของเวลาถ่วง

- เส้นผ่าศูนย์กลาง ความดัน ความหนาแน่น และชนิดของสารที่อยู่รอบ ๆ ส่วนผสมถ่วงเวลา มีผลต่อเวลาถ่วงด้วยเหมือนกัน

หลักที่ต้องใช้ในการออกแบบหรือเตรียมส่วนผสมถ่วงเวลา

- ถ้าจะเพิ่มอัตราการเผาไหม้ให้สูงขึ้น ให้ใช้สัดส่วนของสารเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักอะตอมสูง ๆ

- ถ้าจะลดอัตราการเผาไหม้ ต้องลดความร้อนที่เกิดขึ้นโดยใช้สารเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนน้อย หรืออาจใส่ฉนวนป้องกันความร้อนลงไป

นอกจากนี้อาจมีข้อควรคำนึงถึงเวลาเตรียมส่วนผสม เช่น ขนาดของอนุภาคส่วนผสม ขนาดและคุณลักษณะของสารเจือปน วิธีการอัดส่วนผสม การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน และความชื้นขณะผสมและอัดส่วนผสม

5. ส่วนผสมดินขับ (Propulsive compositions) มีหน้าที่ดันจรวด (rocket) หรือส่วนอื่น ๆ ให้เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง โดยมีแรงดันสูงที่ส่วนท้ายของจรวด ภายในระยะเวลาที่ต้องการส่วนผสมดินขับต้องมีคุณลักษณะดังนี้

- มีความเร็วในการเผาไหม้ที่แน่นอน
- ให้กาซจำนวนมาก จากการเผาไหม้
- ให้เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้น้อยที่สุด และสามารถถูกขับออกไปได้ง่าย

ส่วนผสมดินขับแบ่งตามหน้าที่ได้เป็น 2 กลุ่ม ส่วนผสมดินขับที่ใช้กับอาวุธ และส่วนผสมดินขับที่ทำหน้าที่ขับดัน

5.1 ส่วนผสมดินขับที่ใช้กับอาวุธ (Propulsive powders for weapons) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือดินดำ (Black powder) และดินขับออแกนิก (Organic propulsive powders)

5.1.1 ดินดำ (Black powder) ประกอบด้วยโปตัสเซียมไนเตรด ซัลเฟอร์ และถ่าน ปริมาณโปตัสเซียมไนเตรดยิ่งมาก จะทำให้ดินดำมีพลังมากขึ้น

ตารางที่ 2.6 ส่วนผสมของดินดำ

| ดินดำ | โปตัสเซียมไนเตรด (%) | ซัลเฟอร์ (%) | ถ่าน (%) |
|---|---|---|---|
| ดินดำที่ใช้ทางทหาร | 75 | 10 - 12.5 | 10 - 12.5 |
| ดินดำดั้งเดิม | 62 | 20 | 18 |
| ดินดำอย่างแรง | 75 | 10 | 15 |

คุณลักษณะของดินดำ

- ระเบิดรุนแรง
- ลุกติดไฟได้ง่าย และลุกติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส
- ไวต่อการกระแทกและเสียดสี
- ถ้ามีการสะสมเป็นฝุ่น จะเป็นฝุ่นที่อันตราย
- ทำให้อาวุธสกปรกหลังใช้งาน

5.1.2 ดินขับออแกนิก (Organic propulsive powders) ส่วนผสมสำคัญคือ ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose) ดินขับประเภทนี้ ยังสามารถแบ่งได้อีกเป็น 3 ชนิด คือ ชนิดซิงเกิลเบส (Single base powder) ชนิดดับเบิลเบส (Double-base powder) และชนิดทริเปิลเบส (Triple-base powder)

ก. ดินขับออแกนิกชนิด ซิงเกิลเบส (Single base powder) ใช้ในอาวุธทุกขนาด ส่วนผสมมีดังนี้

- ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose)
- เอทิลอีเทอร์ (Ethyl ether)
- เอทิลอัลกอฮอล (Ethyl alcohol)
- สารอื่น ๆ เช่น ไดไนโตรโทลูอีน (Dinitrotoluene) ช่วยทำให้เย็นลง

ข. ดินขับออเกนิกชนิดดับเบิลเบส (Double-base powder) ใช้ในอาวุธขนาดใหญ่ ส่วนผสมประกอบด้วย

- ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose)
- ไนโตรกลีเซอรีน (Nitroglycerine)
- เอทิลอะซีเตด (Ethyl acetate)
- ไดฟีนีลามีน (Dipheny lamine)
- โปตัสเซียมซัลเฟต(Potassium sulfate)
- กัมอารบิก (Gum arabic)

ค. ดินขับออเกนิกชนิดทริบเปิลเบส (Triple-base powder) ใช้ในอาวุธทุกขนาด ส่วนผสมประกอบด้วย

- ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose)
- ไดเอทิลีนกลีคอลไดไนเตรด (Diethylene glycol dimitrate)
- ไนโตรกัวนาดีน (Nitroguanadine)
- โพลีไวนิลไดไนเตรด (Polyvinyl dinitrate)

ประโยชน์ของดินขับออแกนิกเหล่านี้ คือ

- ให้ควันน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ให้พลังสูง
- ควบคุมบาลลิสติกได้ดีกว่าดินดำ
- ผลิตเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย

5.2 ส่วนผสมดินขับที่ทำหน้าที่ขับดัน (Powders for self-propulsion) แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ ดินขับที่เป็นของแข็ง (Solid Mopellant) มีความเร็วต่ำน้อยกว่า 20 เมตรต่อวินาที ดินขับที่เป็นของเหลว (Liquid propellant) ใช้ในยานอวกาศ และจรวด เช่นออกซิเจนเหลว $(O_2)$ และไฮโดรเจนเหลว $(H_2)$ และดินขับที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลว (Hybrid propellant) ปัจจุบันไม่ค่อยได้ใช้แล้ว

6. ส่วนผสมทำให้เกิดเสียง (Sound composition) มีจุดประสงค์เพื่อเลียนเสียงอุปกรณ์ทางทหาร เช่นปืน หรือลูกระเบิด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นการเผาไหม้ความร้อนสูง (Deflagration) หรือการเผาไหม้ที่มีการระเบิด(Detonation) ซึ่งต้องใช้สารให้ออกซิเจนที่มีพลังสูงจำพวกเปอร์คลอเรต และใช้สารเชื้อเพลิงที่เป็นผงโลหะ

ตารางที่ 2.7 ส่วนผสมเสียงระเบิด

| ส่วนผสม | เสียงระเบิด เบอร์ 1 | เสียงระเบิด เบอร์ 2 | เสียงระเบิด เบอร์ 3 | เสียงระเบิด เบอร์ 4 |
|---|---|---|---|---|
| โปตัสเซียมคลอเรต | 43 | | | |
| โปตัสเซียมเปอร์คลอเรต | | 50 | 64 | 72 |
| ซัลเฟอร์ | 26 | 27 | 13 | |
| อลูมิเนียม | 31 | 23 | 23 | 28 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ความปลอดภัยในโรงงานทั่วไป**

1. สุขวิทยาทั่วไป ได้แก่ เสื้อผ้า ความสะอาด อาหาร และสภาพการทำงาน

1.1 เสื้อผ้า ให้ปฏิบัติตามคำแนะนำเกี่ยวกับความปลอดภัยโดยเปลี่ยนเสื้อผ้า และรองเท้าใส่มาทำงานเก็บไว้ที่ห้องรับฝากเสื้อและสิ่งของ (Cloakroom) เป็นชุดกันไฟ และไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งเนื้อผ้าทำด้วยผ้าฝ้ายชนิดทนความร้อนสูงได้ เช่น Nomex III และสวมใส่รองเท้าป้องกันชนิดพิเศษซึ่งพื้นรองเท้าเป็นแบบกันลื่น และสามารถป้องกันบริเวณรองเท้าและหัวรองเท้าได้ เป่าทำความสะอาดชุดกันไฟ และไฟฟ้าสถิตย์ทุกวัน และซักด้วยวิธีพิเศษทุกสัปดาห์ ใช้อุปกรณ์พิเศษตามข้อบังคับในห้องปฏิบัติงาน เช่น ถุงมือ แว่นตา หน้ากากช่วยหายใจ

1.2 ความสะอาด ข้อบังคับเกี่ยวกับการติดตั้งสุขาภิบาล ตามข้อกำหนดเงื่อนไขในกฎหมายแรงงาน นายจ้างต้องติดตั้งสุขาภิบาลต่อไปนี้คือ ห้องรับฝากเสื้อผ้าและสิ่งของแยกกันสำหรับชายและหญิง เป็นตู้กันไฟพร้อมล็อคให้เพียงพอกับจำนวนผู้ปฏิบัติงาน อ่างล้างหน้า ห้องน้ำ ฝักบัว พร้อมทั้งมีการระบายอากาศเช่นเดียวกับในห้องปฏิบัติงาน ปัดฝุ่นออกจากเสื้อผ้า และล้างมือทุกครั้งที่หยุดพักการทำงาน เมื่อสิ้นสุดการทำงานของแต่ละวันให้เปลี่ยนเสื้อผ้าและถ้าจำเป็นก็ให้อาบน้ำทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อบังคับเกี่ยวกับความปลอดภัยของเฉพาะอย่างนั้น

1.3 อาหาร ห้ามรับประทานอาหาร ของว่างและเครื่องดื่มในห้องปฏิบัติงาน ให้รับประทานอาหารในห้องอาหารที่จัดไว้เฉพาะ ห้ามดื่มเครื่องดื่นที่มีอัลกอฮอล์ทุกชนิดในห้องอาหารและห้องปฏิบัติงาน

1.4 สภาพการทำงาน ตามกฎข้อบังคับกำหนดให้มีการระบายอากาศบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงาน เพื่อลดมลภาวะของสารเคมีหรือสาเหตื่น ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงอากาศร้อน แบ่งเป็น 2 แบบคือ

ก. การระบายอากาศทั่วไปซึ่งเกี่ยวข้องกับอาคาร และไม่ใช่มลภาวะที่มีลักษณะเฉพาะ (Non-specific pollution) สามารถระบายอากาศตามธรรมชาติหรือใช้เครื่องจักรและอัตราการหมุนเวียนอากาศขึ้นอยู่กับแบบของสถานที่นั้น เช่นสำนักงาน

ข. การระบายอากาศที่จัดตั้งขึ้น ณ บริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานและเกี่ยวข้องกับมลภาวะที่มีลักษณะเฉพาะในกรณีนี้ การระบายอากาศและอัตราการหมุนเวียนอากาศจะกำหนดขึ้นตามชนิดของมลภาวะนั้น ถ้าการระบายอากาศไม่เพียงพอต้องใช้เครื่องป้องกันแต่ละอย่างตามข้อกำหนด ตัวอย่างเช่น

- ห้องปฏิบัติงานในโรงงานไพโรเทคนิคที่ไม่มีหน้าต่าง และสำนักงานใช้การระบายอากาศส่วนรวม
- ตำแหน่งที่ผลิตส่วนผสมใช้เครื่องดูดอากาศซึ่งต่อท่อจุ่มลงในน้ำมัน
- ทาสี ใช้ Equipped paint booths
- ในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงให้ใช้ Extractor tables

การระบายอากาศต้องไม่ก่อให้เกิดสิ่งไม่พึงปรารถนาอื่น ๆ เช่น เสียง ระดับความดังของเสียง ต้องมีการประมาณ และตรวจวัดไม่ให้เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในพระราชบัญญัติคือ 85 dB(A) ในที่มีการป้องกันเสียงสะท้อนโดยมีการเก็บรวบรวม ระดับความดังของเสียงอย่างต่อเนื่องที่ละขั้นโดยลำดับ ถ้ามากกว่า 85 dB ต้องกำหนดเป็นพื้นที่เฉพาะ และจัดแผนการทำงานเพื่อที่จะจำกัดเสียง ถ้าเสียงดังเกินกว่า 90 dB(A) หรือ 140 dB ในที่มีการป้องกันเสียงสะท้อน ต้องใช้เครื่องป้องกันเฉพาะอย่าง เจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานในบริเวณที่มีเสียงดังต้องได้รับการประกันสุขภาพ และดูแลจากแพทย์ ตัวอย่างเช่น ในโรงงานไพโรเทคนิค ให้จัดหาเครื่องวัดความดังของเสียงมาใช้ตรวจวัด เมื่อมีการจัดตั้ง ดัดแปลง เปลี่ยนแปลงห้องปฏิบัติงานใหม่หรือมีข้อสงสัย ในกรณีที่ความดังของเสียงมากกว่า 110 dB(A) ให้ใช้เครื่องป้องกัน 2 แบบ คือ Ear muffs และ Ear plugs มีการตรวจสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานตามระยะเวลาอย่างน้อยปีละครั้ง

แสงสว่างต้องมีการออกแบบและติดตั้งในวิถีทางที่เจ้าหน้าที่สามารถเห็นได้ชัดเจน และไม่ทำให้ดวงตาเหนื่อยล้า ระดับความสว่างขึ้นอยู่กับงานที่ปฏิบัติดังนี้ ทางเดินในอาคาร 40 ลักซ์ ห้องเก็บพัสดุ 60 ลักซ์ห้องปฏิบัติงาน ห้องรับฝากเสื้อผ้าและห้องที่ติดตั้งสุขาภิบาล 120 ลักซ์ ห้องทำงานที่มีม่าน 200 ลักซ์

พื้นที่ปฏิบัติงานต้องติดเครื่องป้องกันชนิดถาวร หรือเคลื่อนที่ได้เพื่อป้องกันแสงอาทิตย์ไม่ให้ส่องตรงลงมาโดนสารไพดรเทคนิค และจัดหา Luxmeter มาใช้เมื่อมีการจัดตั้ง ดัดแปลงหรือเปลี่ยนแปลงห้องปฏิบัติงานใหม่ ในโรงงานไพโรเทคนิค ความสว่างของแสงที่ใช้จะมากกว่าที่กำหนดไว้ในข้อบังคับ คือ ทางเดิน 200 ลักซ์ ห้องปฏิบัติงาน 300 ลักซ์ ห้องทดลองและสำนักงาน 500 ลักซ์

2. อันตรายจากกระแสไฟฟ้า ในอาคารไพโรเทคนิค อาจเกิดอันตรายได้จากไฟไหม้ และการระเบิด สาเหตุอาจเกิดจาก ไฟฟ้าลัดวงจร ประกายไฟฟ้าและไฟฟ้าสถิตย์ ซึ่งผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับอันตรายจากอวัยวะภายในถูกเผาไหม้ ระบบการหายใจ และหัวใจ หยุดชะงักหรือช้าลง เพราะฉะนั้น โรงงานต้องปฏิบัติตามกฎข้อบังคับความปลอดภัยทางไพโรเทคนิค ความปลอดภัยในการติดตั้งระบบกระแสไฟฟ้า มาตรฐานวัสดุที่ใช้และวิธีการ สายเคเบิลต้องหุ้มด้วยฉนวนกันไพดรเทคนิค และต่อกับสายดินภายใต้ฐานอาคาร สายเคเบิลระหว่างอาคารต้องฝังอยู่ใต้ดิน และห้ามเดินสายในรางน้ำหรือท่อน้ำ สายล่อฟ้าบนอาคารไพโรเทคนิค ต้องต่อโดยตรงกับสายดิน ห่างไกลจากถังนำไฟฟ้าในอาคาร และสื่อไฟฟ้าอื่นๆ เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากประกายไฟ สำหรับการต่อดินรูปสามเหลี่ยมต้องต่อในแนวตั้งฉากกับแต่ละจุด

การบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า ต้องดูแลฉนวนป้องกันที่หุ้มสารเคเบิล ฟิวส์ สะพานไฟ (Circuit-breakers) และซ่อมแซมทันทีเมื่อเกิดปัญหาขึ้น อบรมผู้ปฏิบัติงานให้สามารถเปิดปิดสวิทช์ตู้ควบคุมไฟได้ถูกต้อง ให้การอบรมพิเศษกับช่างไฟฟ้า ถึงอันตรายที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (20,000 โวลท์) และไฟฟ้าแรงต่ำ (220 - 500 โวลท์) อนุญาตให้เฉพาะช่างไฟฟ้าเพียง 2 คนเท่านั้นที่สามารถเข้าไป

ปฏิบัติงานกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ต้องตรวจสอบระบบไฟฟ้าทุก ๆ ปี ข้อต่อสายกราวด์ทุกแห่ง หม้อแปลงไฟฟ้า

3. อันตรายจากสารเคมีและสารพิษ สารเคมี และสารพิษจะกัดกร่อนต่อผิวหนัง ดวงตา ทำให้เกิดอาการคันเป็นโรคผื่นคัน เกิดอาการระคายเคืองและเป็นพิษต่อระบบหายใจ และระบบย่อยอาหาร วิธีป้องกันมีดังนี้

- ทราบถึงสัญญลักษณ์อันตราย
- ทราบอันตรายโดยเฉพาะของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด
- ทราบถึง Frequent exposure limit value และ Mean exposure limit value
- เก็บผลิตภัณฑ์ไว้อย่างชัดเจนในสถานที่เหมาะสม
- ไม่เทผลิตภัณฑ์อันตรายลงในภาชนะบรรจุอาหาร
- ติดป้ายทุกขวด
- ล้างมือก่อนทำสิ่งใด ๆ ทุกครั้ง
- ใช้เครื่องป้องกันเฉพาะบุคคลถ้าเครื่องป้องกันส่วนรวมไม่เพียงพอ

เครื่องป้องกันอันตรายจากสารเคมีนอกจากเครื่องป้องกันทางไพโรเทคนิค คือ สำหรับเครื่องป้องกันส่วนรวม สร้างระบบระบายอากาศและหรือระบบฟอกอากาศ สำหรับเครื่องป้องกันเฉพาะบุคคล ให้ใช้ถุงมือให้เหมาะกับชนิดของสาร ถุงมือยางนีโอพรีน สำหรับสารที่เป็นฝุ่นละอองและเครื่องมือป้องกันดวงตาให้เหมาะกับพื้นที่ปฏิบัติงาน เลือกใช้หน้ากาก(MASKS) ให้เหมาะสมดังนี้

| ลักษณะของมลภาวะ | ชนิดของหน้ากากที่ใช้ |
|---|---|
| ผงหรือฝุ่นละออง | หน้ากากป้องกันฝุ่นอย่างบางแบบ 3M |
| สารละลาย | หน้ากากอย่างบางมีสารกรองสารละลายอยู่ภายใน<br>หน้ากากครึ่งหน้าพร้อมไส้กรองไอสาร และป้องกันฝุ่น |
| ก๊าซพิษและฝุ่น | หน้ากากเต็มหน้าพร้อมตลับไส้กรองที่เหมาะสมเลือกใช้ตามชนิดของก๊าซพิษ และหรือฝุ่น |
| ควันจากการบัดกรี | หน้ากากอย่างบาง มีสารกรองที่เหมาะสมอยู่ภายใน |

4. การป้องกันสิ่งแวดล้อม

4.1 น้ำเสีย ในเขตที่ไม่ใช่พื้นที่ไพโรเทคนิค น้ำที่ใช้แล้วและสารอินทรีย์ที่เหลือให้ฝ่ายสถานีบำบัดส่วนในเขตไพโรเทคนิคให้ผ่านถังบำบัดน้ำเสีย ถังตกตะกอน และหลังจากบำบัดแล้วปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมโดยมีค่ากำหนดดังนี้

| | |
|---|---|
| สารแขวนลอยในน้ำไม่เกิน | 30 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| Biochemical oxygen demand | ไม่เกิน 40 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| Chemical oxygen demand | ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร |

| | |
|---|---|
| ไนโตรเจน | ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร |
| อุณหภูมิ | น้อยกว่า 30 องศาเซนติเกรด |
| ความเป็นกรดด่าง (PH) | อยู่ระหว่าง 5.5-8.5 |

4.2 เสียง ระดับเสียงในเขตโรงงานระหว่าง 7.00 น.-22.00 น. ไม่เกิน 50 dB(A) และระหว่าง 22.00 น.-7.00 น. ไม่เกิน 40 dB(A) ยกเว้นในกรณีที่มีการทดสอบ

4.3 อากาศเสีย โรงงานไพโรเทคนิคต้องออกแบบให้ไม่มีอากาศเสีย โดยการจัดตั้งวิธีจัดการมลภาวะและวิธีปฏิบัติงาน

4.4 กากของเสีย การของเสียไพโรเทคนิคให้จัดตั้งวิธีพิเศษในการทำลายเพื่อหลีกเลี่ยงอากาศเสีย รวบรวมเศษ โลหะ กระดาษ พลาสติกและน้ำมันไว้ด้วยกัน รวบรวมผลิตภัณฑ์เคมีโดยเจ้าหน้าที่ชุดปฏิบัติงาน

5. การรักษาความปลอดภัย

5.1 ในเวลากลางวัน จัดยามรักษาการณ์ประตูทางเข้าทุกประตูประมูล 1 คน ตรวจสอบทุกคนที่เข้ามาจดบันทึกคำถามของแขกที่มาพบและจากไปในทุกเหตุการณ์ ป้องกันทรัพย์สินของโรงงานและความลับทางทหารเก็บที่จุดบุหรี่ของแขกไว้ที่ทางเข้า

5.2 ในเวลากลางคืนจัดยามรักษาการณ์ประตูทางเข้าทุกประตูประตูละ 1 คน และเดินตรวจภายในโรงงานคืนละ 3 รอบ ทุกคืน ยามสามารถจะติดต่อกับบุคคลผู้มีหน้าที่ภายนอกโรงงานได้ตลอดเวลาและติดต่อทางโทรศัพท์หรือใช้ระบบปุ่มสัญญาณบอกเหตุแจ้งต่อสถานีตำรวจได้ทันที และมีเจ้าหน้าที่ตำรวจได้ทันที และมีเจ้าหน้าที่ตำรวจตรวจภายนอกรอบโรงงาน 3-4 ครั้งต่อสัปดาห์

5.3 รั้วควรมีความสูงอย่างต่ำ 2.5 เมตร ส่วนบนยื่นออกไปด้านนอก และพันด้วยลวดหนาม 3 แถว

5.4 มีการตรวจตราการรักษาความปลอดภัยโดยผู้ที่มีอำนาจตามระยะเวลา โดยกรรมการบริษัท ปีละครั้ง หน่วยรักษาความปลอดภัยทางทหารปีละครั้ง และตามสัญญาที่ตกลงไว้กับกองทัพ

6. ระเบียบปฏิบัติ ในโรงงานไพโรเทคนิคจัดให้มีระเบียบปฏิบัติดังนี้

6.1 สัญญาณเตือนบอกเหตุ สัญญาณเตือนเสียงไซเรน 1 ครั้ง (ประมาณ 10 วินาที) แสดงว่าจะทำการยิงหรือทดสอบที่มีเสียงดัง สัญญาณเตือนเสียงไซเรน 3 ครั้ง (แต่ละครั้งนาน 10 วินาที) แสดงว่าไฟไหม้ ให้รวบรวมเจ้าหน้าที่ดับเพลิงให้พนักงานทุกคนออกจากตึก สัญญาณเตือนเสียงไซเรน 3 ครั้ง (ประมาณ 10 วินาที) และเสียงไซเรนยาว นาน 1 นาที เป็นสัญญาณอพยพให้พนักงานทุกคนออกจากตึกมารวมกันอยู่ที่จุดอพยพนับจำนวนคนที่อยู่และหายไป ในกรณีที่เกิดเหตุอันตรายให้พนักงาน กดปุ่มสัญญาณอันตราย (Alarm buttons) ที่ติดตั้งไว้ในแต่ละอาคาร หรือติดต่อพนักงานต่อโทรศัพท์ แจ้งสถานที่เกิดเหตุ ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องในเหตุการณ์ มีผู้ได้รับบาดเจ็บหรือไม่และรอคำสั่งจากผู้มี

อำนาจ ถ้ามีผู้ได้รับบาดเจ็บอย่าละทิ้งผู้บาดเจ็บแม้จะบาดเจ็บเล็กน้อยโดยไม่ได้ดูแล ให้แจ้งพนักงานรักษาความปลอดภัยทราบ และนำไปพยาบาลโดยด่วน ถ้าสามารถ เคลื่อนไหวได้

ในกรณีของไฟไหม้ ให้พยายามควบคุมโดยใช้ถังดับเพลิงที่ติดตั้งอยู่รอบ ๆ อาคาร และติดต่อพนักงานโทรศัพท์ ถ้าต้องการพนักงานดับเพลิง ถ้าไม่สามารถควบคุมได้ให้ตามรถดับเพลิง

6.2 อันตรายจากสารเคมี ถ้าเสื้อผ้าเปรอะเปื้อนสารอันตรายให้รีบเอาออกก่อนที่จะถูกผิวหนัง ถ้าสารถูกผิวหนัง ให้ล้างบริเวณที่ถูกสารด้วยน้ำก๊อกอย่างน้อย 15 นาที และใช้ฝักบัวถ้าจำเป็น ถ้าสารเข้าตาให้ล้างด้วยน้ำก๊อก อย่างน้อย 15 นาที และแจ้งพนักงานรักษาความปลอดภัยทราบ

6.3 อันตรายจากกระแสไฟฟ้า อย่าสัมผัสกับผู้ที่ถูกไฟฟ้า ให้ตัดแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแล้วนำผู้ที่ได้รับบาดเจ็บออกจากสายเคเบิล โดยใช้วัตถุที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ถ้ามีไฟไหม้ห้ามดับด้วยน้ำ รีบติดต่อพนักงานต่อโทรศัพท์เพื่อขอความช่วยเหลือ และตามผู้เชี่ยวชายการปฐมพยาบาลในโรงงาน

6.4 การฝึกอบรม โรงงานต้องจัดให้มีผู้เชี่ยวชาญในการปฐมพยาบาลโดยได้รับการฝึกอบรมจากครูผู้ทรงคุณวุฒิเป็นประจำทุกปี เกี่ยวกับการป้องกันไม่ให้ผู้เคราะห์ร้ายอาการแย่ลงและได้รับอุบัติเหตุเกินกว่าเหตุ มีความระมัดระวังโดยทราบถึงสภาพของผู้เคราะห์ร้ายอย่างละเอียดเพื่อที่จะให้ความช่วยเหลือทางการแพทย์ และควรจัดให้มีผู้เชี่ยวชาญในการปฐมพยาบาล 1คนต่อพนักงาน 10 คน

6.5 อุปกรณ์ดับเพลิงประจำห้องปฏิบัติงาน ประกอบด้วย อุปกรณ์ดับเพลิงอัตโนมัติตรวจจับด้วยเซลรับแสง 9 กิโลกรัม ผงดับเพลิงไพโรเทคนิค 6 กิโลกรัม คาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับดับเพลิงที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า และเครื่องดับเพลิงขนาด 50 กิโลกรัม ต่ออาคาร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## กฎทั่วไปในการวางผังโรงงานไพโรเทคนิค

ในบริเวณโรงงานไพโรเทคนิค จะมีการแบ่งพื้นที่ออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ บริเวณเฉื่อย และบริเวณระเบิด

บริเวณเฉื่อย (Inert area) หมายถึง ส่วนของโรงงานไพโรเทคนิคที่ประกอบด้วยอาคารสำนักงาน อาคารเก็บผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่ไพโรเทคนิค อาคารหรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่มีความเสี่ยงอันตรายจากการเผาไหม้(เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่ไพโรเทคนิค) เช่น ที่จอดรถ อู่ซ่อมรถ และที่เก็บสารอื่นๆ ที่ไม่ได้เป็นส่วนผสมของสารระเบิด เป็นต้น

บริเวณระเบิด (Explosive area) หมายถึง ส่วนของโรงงานไพโรเทคนิคที่ประกอบด้วยอาคารเก็บวัตถุระเบิดและอุปกรณ์ระเบิดที่ใช้ในการแสดงผล (Effects) ของผลิตภัณฑ์ไพโรเทคนิค ห้องผลิต ห้องบรรจุห้องบรรจุหีบห่อ ห้องศึกษาและทดลองชิ้นส่วนระเบิด ห้องบริการ รวมทั้งบริเวณทำลายด้วย

ระยะห่างระหว่างสองอาคารในบริเวณระเบิดและระยะระหว่างอาคารหนึ่งๆ หรืออุปกรณ์ใดๆ ที่ตั้งอยู่นอกอาคารเหล่านั้น จะต้องห่างกันพอสมควร เพื่อช่วยลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับคนงานจากอุบัติเหตุ ถ้าอาคารมีผนังที่พังได้เมื่อถูกแรงระเบิด บริเวณด้านหน้าผนังนี้ จะต้องไม่มีอาคารใดๆ ตั้งอยู่เลย

เมื่อมีอุบัติเหตุการระเบิด (Explosive Accident) เกิดขึ้นในโรงงาน จะหมายถึงการระเบิด การลุกไหม้เป็นไฟ หรือการแยกสลายตัวของอุปกรณ์ไพโรทคนิคหรือชิ้นส่วนระเบิด ซึ่งไม่ได้เกิดในการทำงานตามปกติ และมีโอกาสที่จะทำอันตรายกับคนงานและสิ่งของได้ ในการเกิดอุบัติเหตุการระเบิดจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดการระเบิดและผู้รับผลการระเบิด แหล่งกำเนิดการระเบิด (Generator) หมายถึงแหล่งที่ทำให้เกิดการระเบิด และเกิดผลของการระเบิดตามมา ผู้รับผลการระเบิด (Receiver) อาจเป็นสิ่งที่สามารถระเบิดได้ (Explosive Installation) หรือเป็นสิ่งที่ไม่สามารถระเบิดได้ (Non Explosive Installation) ผู้รับผลการระเบิด แบ่งได้หลายชนิด คือ a1,a2,a3, b1,b2,b3, c1,c2,c3 ขึ้นอยู่กับประเภทของสิ่งนั้นๆ ผลการระเบิด (Explosive Effect) อาจปรากฏเป็น การระเบิด การลุกไหม้ หรือการพุ่งของเศษวัสดุ ผลเหล่านี้ขึ้นอยู่กับระดับอันตราย คลาสดิวิชั่น และกลุ่มของอุปกรณ์ไพโรเทคนิคหรือชิ้นส่วนที่พิจารณา

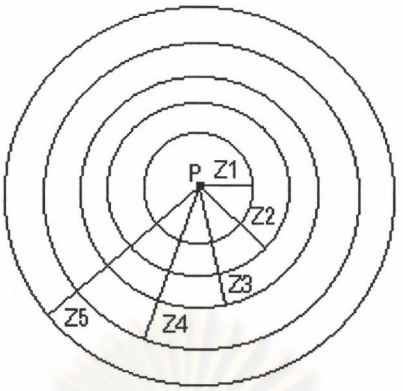
ตารางที่ 2.8 การแบ่งประเภทของผู้รับผลการระเบิด

| ประเภท | ลักษณะ | สัญลักษณ์ |
|---|---|---|
| a) สิ่งก่อสร้างหรือตำแหน่งที่อยู่ภายในโรงงานไพโรเทคนิค | 1. อุปกรณ์ไพโรเทคนิค (สถานที่ทำงาน อาคารเก็บวัตถุ) รวมทั้งถนน และบริเวณที่อยู่ใกล้กับสถานีทำงาน | a1 |
| | 2. อุปกรณ์ไพโรเทคนิคอื่นๆ ที่ไม่ใช่ a1 | a2 |
| | 3. อาคารและสำนักงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับไพโรเทคนิค | a3 |
| b) ถนนที่อยู่ภายนอกบริเวณโรงงานไพโรเทคนิค | 1. ถนนที่มีความหนาแน่นจราจรต่ำ รถวิ่งไม่เกิน 200 คัน/วัน | b1 |
| | 2. ถนนที่มีความหนาแน่นจราจรปานกลาง รถวิ่งระหว่าง 200 - 2,000 คัน/วัน | b2 |
| | 3. ถนนที่มีมีความหนาแน่นจราจรสูง รถวิ่งมากกว่า 2,000 คัน/วัน | b3 |
| c) อาคารสิ่งก่อสร้างและสถานที่ภายนอกบริเวณโรงงานไพโรเทคนิค | 1. บริเวณที่มีกลุ่มคนอยู่น้อย บริเวณที่ไม่มีอาคาร (สวน ที่พัก ฟาร์ม โรงเก็บรถ เป็นต้น) | c1 |
| | 2. บริเวณที่มีอาคาร บ้าน ที่อยู่อาศัย | c2 |
| | 3. เขตโรงงานอุตสาหกรรม เขตค้าขาย ฟาร์ม บริเวณที่มีผู้ คนอาศัยอยู่โดยไม่จำเป็นต้องอยู่ติดโรงงาน | c3 |
| | 4. บริเวณที่มีกลุ่มคนอยู่มาก เช่น สนามกีฬา โบสถ์ ตลาด โรงเรียน โรงพยาบาล บริเวณเมืองใหญ่ๆ | c4 |

ในวิชาด้านไพโรเทคนิคมีการแบ่งสารไพโรเทคนิคออกเป็นคลาสและดิวิชั่นต่างๆ โดยอาศัยผลการระเบิดเป็นเกณฑ์ ดังนี้

ตารางที่ 2.9 คลาสและดิวิชั่นของสารไพโรเทคนิค

| คลาส | ดิวิชั่น | ลักษณะของอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนไพโรเทคนิค |
|---|---|---|
| 1 | 1 | อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดอันตรายเนื่องจากการระเบิดอย่างรุนแรงแบบทันทีทันใด |
| 1 | 2 | อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดอันตรายเนื่องจากการพุ่งของเศษระเบิดแต่ไม่ระเบิดแบบรุนแรง |
| 1 | 3 | อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดอันตรายเนื่องจากการเผาไหม้ พร้อมกับอันตรายเล็กน้อย เนื่องจากการพุ่งของเศษระเบิด แต่ไม่ได้ระเบิดแบบรุนแรง แบ่งได้เป็น 2 ประเภทย่อย<br>- 3a ได้แก่อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้<br>- 3b ได้แก่อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้อย่างช้าๆ และมีโอกาสอยู่บ้างที่ จะเกิดการระเบิดหรือมีการพุ่งของเศษระเบิด |
| 1 | 4 | อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่ไม่มีอันตรายใดๆ อยู่ในภาชนะบรรจุซึ่งใช้ในการแสดงผลเมื่อมีการยิงหรือจุดชนวน และไม่มีการพุ่งของเศษระเบิด |




รูปที่ 2.8 บริเวณอันตราย

เมื่อมีการระเบิดเกิดขึ้นจะมีการแบ่งบริเวณที่อยู่ข้างเคียงออกเป็นบริเวณต่างๆหลายบริเวณ เรียกว่าบริเวณอันตราย (Danger Zone) ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับผลจากการระเบิดถึงระดับที่กำหนด แบ่งได้เป็นหลายบริเวณ คือ Z1 Z2 Z3 Z4 และZ5 ผลของการระเบิดเป็นดังนี้

ตารางที่ 2.10 ผลของการระเบิดที่บริเวณต่างๆ

| ผลเกิดกับ | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 |
|---|---|---|---|---|---|
| คน | บาดเจ็บมากกว่า 50 % | บาดเจ็บสาหัส มีโอกาสตายได้ | บาดเจ็บ | มีโอกาสบาดเจ็บ | บาดเจ็บเล็กน้อย |
| สิ่งของ | เสียหายสูงมาก | เสียหายสูง | เสียหายปานกลางหรือน้อย | เสียหายน้อย | เสียหายน้อยมาก |

การคำนวณระยะอันตราย จะหาระยะ R (หน่วยเป็นเมตร) ของบริเวณอันตราย เนื่องมาจากปริมาณของสารระเบิด Q (หน่วยเป็นกิโลกรัม) ประกอบกันเป็นอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนระเบิด ที่ระดับน้ำทะเล และในสภาวะบรรยากาศมาตรฐาน คืออุณหภูมิประมาณ 15 องศา ความดัน 1013 มิลลิบาร์ เหนือพื้นราบโดยไม่มีอะไรมาขวางกั้น ถ้าชิ้นส่วนสามารถระเบิดได้หลายแบบ การคำนวณจะใช้แบบที่รุนแรงที่สุดเป็นหลัก

ตารางที่ 2.11 การคำนวณรัศมีบริเวณอันตราย

| คลาส/ดิวิชั่น | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 | $0 < R1 < 5Q^{1/3}$ | $< R2 < 8Q^{1/3}$ | $< R3 < 15Q^{1/3}$ | $< R4 < 22Q^{1/3}$ | $< R5 < 44Q^{1/3}$ |
| 1.2 | 0 < R1 < 15 | < R2 < 90 | R3 < 200 | R4 < 300 (1) | R5 < 600 (1) |
| 1.3 a,b | $R1 < 2.5Q^{1/3}$ | $R2 < 3.5Q^{1/3}$ | $R3 < 5Q^{1/3}$ | $R4 < 6.5Q^{1/3}$ | . - |
| | $R1 < 1.5Q^{1/3}$ | $R2 < 2Q^{1/3}$ | $R3 < 2.5Q^{1/3}$ | $R4 < 3.25Q^{1/3}$ | - |
| 1.4 | R1 = 0 | $R2 < 0.5Q^{1/3}$ หรือ 5 ถ้า Q > 100 | R3 < 10 | R4 < 25 | |

(1) ค่าเหล่านี้ จะลดลง เมื่อ Q < 15,000 กิโลกรัม

โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ (Probability of Occurence of an Accident) ในสาขาความปลอดภัยของไพโรเทคนิค โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ จะพิจารณาจาก ประเภทของสารหรือชิ้นส่วนระเบิด ชนิดของการปฏิบัติงาน รวมทั้งอาคารเก็บสารด้วย ระดับอันตรายการระเบิด (Explosive Hazard) เป็นค่ารวม (Combination) ระหว่างบริเวณอันตราย กับ โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ แสดงได้เป็นสัญลักษณ์ ZiPi

ตารางที่ 2.12 โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ

| โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ | ตัวอย่างการปฏิบัติงาน | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| P1 | การเก็บชิ้นส่วนที่ไม่มีความไวต่อปฏิกริยา ต่างจากสารที่ใช้ในการจุดระเบิด บรรจุในภาชนะมาตรฐานเพื่อการขนย้าย | P1 มีค่าต่ำกว่า 0.0001 |
| P2 | การบรรจุหีบห่อ การผสม การอบ ของชิ้นส่วนที่มีความไวเล็กน้อย รวมทั้งการขนย้ายชิ้นส่วนที่บรรจุในภาชนะเพื่อการขนย้ายเหล่านี้ด้วย | P2 มีค่าระหว่าง 0.0001 - 0.001 |
| P3 | การกระทำกับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ที่สามารถระเบิดได้ทุกเวลา การผลิต การผสม การอบ ของชิ้นส่วนที่มีความไวสูง รวมทั้งการขนย้ายชิ้นส่วนที่บรรจุในภาชนะเพื่อการขนย้ายเหล่านี้ด้วย | P3 มีค่าระหว่าง 0.001 - 0.01 |

ถ้าผู้รับผลการระเบิด ต้องเผชิญกับแหล่งกำเนิดการระเบิดหลายๆ แหล่งแล้ว โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุจะเท่ากับผลรวมของโอกาสย่อย ๆ ทั้งหมด ตารางต่อไปนี้ แสดงการวางผังที่เป็นไปได้ โดยที่ P เป็นค่า ณ จุดที่จะเกิดการระเบิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.13 กฎการวางผัง

| บริเวณอันตราย | โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุระเบิด | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 |
| Z1 | a0 | a0 | a0 (*) | a0 (**) | a0 (**) |
| Z2 | a1 | a1 | a1 | a1 (*) | a1 (**) |
| | a2 | a2 (*) | | | |
| Z3 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 | a1 | a1 | a1 (*) |
| | a2 | a2 | a2 | | |
| | a3 | | | | |
| Z4 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 | a1 | a1 |
| | a2 b2 c2 | a2 b2 c2 | a2 | a2 | |
| | a3 | | | | |
| Z5 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 | a1 b1 c1 |
| | a2 b2 c2 | a2 b2 c2 | a2 b2 c2 | a2 b2 c2 | a2 b2 c2 |
| | a3 b3 c3 | a3 b3 c3 | a3 b3 c3 | a3 b3 c3 | a3 b3 |

(*) คนงานต้องทำงานไม่เกิน 10% ของเวลาทำงาน

(**) ไม่อนุญาตให้มีคนงานบริเวณนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**กฎการก่อสร้างทั่ว ๆ ไปของโรงงานไพโรเทคนิค**

1 วัสดุก่อสร้างที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารโรงงานไพโรเทคนิค จะต้องเป็นวัสดุที่ช่วยลดอันตรายจากการระเบิด นอกจากนี้ยังต้องมีมาตรการป้องกันการร่วงหล่นของหลังคาและเพดานในอาคารที่มีคนทำงานอยู่ ในกรณีที่มีการระเบิดเกิดขึ้นในอาคารอื่น สิ่งสำคัญคือการเลือกชนิดของวัสดุการเคลือบวัสดุ เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นในกรณีที่มีการกระทบกระแทกกับพื้น ผนัง เพดาน และโครงของอาคารไพโรเทคนิค

ตำแหน่งที่อยู่นอกบริเวณ Z1,Z2,Z3,Z4 บนพื้นราบที่ไม่มีเครื่องกั้นเพื่อป้องกันการระเบิดของอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่างๆ (1.1,1.2,1.5) ในกรณีที่มีการระเบิดจะมีความเสี่ยงที่จะได้รับผลจากการพุ่งของเศษกระจกได้ เศษกระจกเหล่านี้แหลมคมและมีความเร็วพอที่จะทำอันตรายกับคนงานที่อยู่ภายในอาคารได้

บริเวณระเบิดภายในอาคาร ที่มีคนทำงานอยู่ จะต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษเกี่ยวกับวัสดุที่จะใช้ทำผนัง ประตู และหน้าต่าง โดยเฉพาะกระจก เมื่อกระจกแตกเนื่องจากแรงดันที่มากเกินไปทั้งจากภายในและภายนอก กระจกต้องไม่เป็นเศษที่มีส่วนแหลมคม ในอาคารที่มีสารที่ระเบิดได้และไวต่อแสงอาทิตย์ กระจกจะต้องไม่มีส่วนช่วยขยายความเข้มของแสง และต้องสามารถกรองแสงได้ (โดยการเคลือบพิเศษ)

2 การออกแบบอาคารในพื้นที่ระเบิด

2.1 อาคารจะต้องออกแบบมาเพื่อหลีกเลี่ยงการระเบิดที่อาจทำให้เกิดอันตรายกับคน ห้ามใช้อาคารชั้นใต้ดินในการปฏิบัติงานใดๆ เกี่ยวกับสารระเบิด อาคารจะมีฝุ่นระเบิดปกคลุมมาก ดังนั้นต้องใช้เพดานที่ไม่เก็บฝุ่นและสามารถตรวจสอบและทำความสะอาดได้ง่าย

2.2 ทางออกและทางออกฉุกเฉิน ในอาคารไพโรเทคนิค ความกว้างของทางออก จะต้องมีความสัมพันธ์กับจำนวนคนงานและอุปกรณ์การขนย้ายวัสดุที่ใช้ทางออก ในกรณีที่มีคนงาน 5 คน จะต้องมีทางออกอย่างน้อย 2 ช่อง แต่ละช่องต้องมีความกว้างไม่น้อยกว่า 0.8 เมตร ในกรณีที่มีคนงานระหว่าง 3 - 5 คน ถ้ามีทางออกเพียงช่องเดียวจะต้องมีความกว้างไม่น้อยกว่า 1.40 เมตร ในกรณีที่มีคนงานระหว่าง 6 - 10 คน ทางออกต้องมีความกว้างไม่น้อยกว่า 1.80 เมตร และความกว้างจะต้องเพิ่มขึ้น 0.60 เมตร ทุกๆ คนงาน 5 คนที่เพิ่ม ยกเว้น 10 คนแรก

ประตูและทางออกจะต้องเปิดออกไปข้างนอกได้ โดยคนงานสามารถผลักจากข้างในหรือข้าง นอกได้ ข้อกำหนดนี้ไม่ได้รวมถึงอาคารเก็บวัตถุซึ่งใช้ประตูแบบเลื่อน และต้องเปิดอยู่เสมอในขณะที่มีคนทำงานอยู่

ในสถานที่มีการทำงานไม่บ่อยนัก อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่จะเกิดอันตรายจากการระเบิดได้ จะต้องอยู่ห่างจากทางออกรหรือที่กำบังมากกว่า 7 เมตร ระยะทางนี้คนงานสามารถวิ่งไปยังทางออกหรือที่กำบังได้ทัน ข้อกำหนดนี้ไม่ได้รวมถึงอาคารเก็บวัตถุ

2.3 ท่อระบายน้ำทั้งภายในและภายนอก จะต้องไม่ให้ผลของการระเบิดหรือการเผาไหม้ผ่านมาทางท่อนี้ได้ และต้องดูแลบำรุงรักษาได้ง่าย

3. กฎอื่นๆ ในการออกแบบ

3.1 สายดินจะต้องต่อลึกลงไปในดินรอบๆ อาคาร และสายล่อฟ้าต้องนำมาต่อกับสายดินนี้ แต่ทุกๆ ข้อต่อจะต้องต่อกับสายดิน 3 จุด สายล่อฟ้าต้องอยู่ห่างจากตัวนำต่างๆ ที่อยู่ในอาคาร รวมทั้งสายดินด้วย เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟระหว่างสายล่อฟ้ากับตัวนำ

3.2 ท่อต่อระหว่างสายดินกับดิน ในอาคารไพโรเทคนิค การต่อสายดินลงไปในดินนั้นจะต่อโดยตรงไม่ได้ ต้องใช้ท่อยาวฝังลงดินก่อน แล้วจึงนำสายดินมาต่อกับท่อนี้อีกทีหนึ่ง

3.3 เครือข่ายระบบไฟฟ้า บริเวณไพโรเทคนิคและรอบๆ ห้ามใช้สายไฟที่ไม่มีฉนวนหุ้มเป็นสายไฟที่เดินเหนือพื้น ท่อระบายน้ำใช้สำหรับระบายน้ำเท่านั้น ห้ามใช้เป็นท่อเดินสายไฟ สายไฟฟ้าทั่วไปต้องอยู่ใต้ดิน ท่อและสายไฟเครือข่ายจะต้องอยู่เหนือพื้นดิน เพื่อง่ายในการจำแนกสายไฟ ในอาคารไพโรเทคนิค ที่มีกาซไวไฟหรือมีฝุ่นที่ระเบิดได้ ระบบไฟฟ้าจะต้องมีคุณสมบัติ คือ ป้องกันไม่ให้ฝุ่นเข้ามาได้ (กำหนดเป็น IP65) และต้องลดผลของการระเบิดหรือการลุกไหม้ที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ นอกจากนี้ระบบไฟฟ้าจะต้องออกแบบมาเพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น โดยพิจารณาจากธรรมชาติของสารระเบิดที่เก็บอยู่ในอาคารนั้น

3.4. ระบบควบคุมแหล่งจ่ายไฟ ในกรณีฉุกเฉินจะต้องสามารถตัดแหล่งจ่ายไฟของทุกๆ อาคารได้จากแผงควบคุมไฟฟ้า แผงควบคุมนี้อาจจะแยกเป็นของแต่ละอาคารหรืออยู่รวมเป็นกลุ่มก็ได้ ตั้งอยู่ใกล้ๆอาคาร และต้องง่ายในการใช้และเข้าถึง

3.5. ระบบระบายอากาศ ถ้าอาคารมีฝุ่นและสารที่ระเบิดได้ปกคลุมอยู่ อาคารจะต้องมีเครื่องกรองอากาศ และระบบการทำความสะอาดฝุ่นที่มีประสิทธิภาพ มีการตรวจสอบและทำความสะอาดเป็นระยะๆ

3.6 เครื่องทำความร้อนและเครื่องทำความเย็นของห้องไพโรเทคนิค การติดตั้งเครื่องทำความร้อนสำหรับอาคารและเครื่องจักร จะต้องหลีกเลี่ยงอันตรายที่เกิดจากอุณหภูมิ โดยพิจารณาธรรมชาติของสาร เครื่องทำความร้อนนี้จะต้องรักษาระดับความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมของห้องได้ ในห้องไพโรเทคนิค

เครื่องทำความร้อนจะต้องทำจากวัสดุที่สามารถเปลี่ยนได้หรือคลุมด้วยวัสดุที่เหมาะสม ถ้าในห้องมีฝุ่นที่เป็นอันตราย เครื่องทำความร้อนจะต้องราบเรียบ การวางตำแหน่งของเครื่องทำความร้อนต้องสัมพันธ์กับพื้น ผนังและเพดาน ง่ายในการทำความสะอาด และต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยป้องกันไม่ให้วัตถุอื่นๆ มาสัมผัสกับส่วนร้อนของเครื่อง

ถ้าในห้องมีกาซและสารที่ไวไฟมาก จะต้องมีระบบหมุนเวียนอากาศ เครื่องทำอากาศร้อนจะต้องตั้งอยู่นอกห้อง ห้ามนำอากาศภายนอกมาใช้ใหม่ถ้ายังไม่ได้ฟอกและทำให้บริสุทธิ์ก่อน

ห้ามใช้อากาศร้อนที่ได้จากระบบหมุนเวียนอากาศโดยผ่านห้องเผาไหม้ ตำแหน่งของท่อไอดีของอากาศร้อนจะต้องไม่ทำให้ฝุ่ภายในห้องเคลื่อนตัวขึ้นข้างบน

3.7 ประตู ทางออกและทางออกฉุกเฉิน ประตูจะต้องสามารถทนไฟได้ไม่น้อยกว่า 15 นาที ประตูและทางออกของสถานที่ทำงานทั้งหมดจะต้องมีระบบ Anti Sharp-Shutting

3.8 ระบบดับไฟอัตโนมัติ ในการทำงานกับสารที่ไวไฟ มีโอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุได้สูง ดังนั้นจึงต้องมีระบบดับไฟอัตโนมัติ สารที่ใช้ในการดับไฟจะต้องเข้ากันได้กับสารที่เป็นวัตถุไวไฟนั้น นอกจากนี้ระบบดับไฟอัตโนมัตินี้จะต้องควบคุมด้วยมือได้ และติดตั้งกระจายทั่วไป

3.9 ระบบช่วยเหลือเบื้องต้น ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ การดับไฟที่กำลังไหม้คนงานจะทำได้โดยใช้สายยางฉีดน้ำหรือผ้าคลุมดับไฟ อุปกรณ์เหล่านี้ควรจะอยู่ใกล้กับอาคาร ในกรณีที่อุบัติเหตุเป็นการลุกไหม้ของสารเคมี การฉีดน้ำจะต้องฉีดไปในทิศออกไปจากอาคาร ถ้าไฟไหม้เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ระบบที่จะใช้ในการดับไฟจะต้องป้องกันการจุดติดไฟในอาคารได้

3.10 ห้องเปลี่ยนเสื้อผ้า ในสถานที่ทำงาน จะอนุญาตให้คนงานใช้เฉพาะเสื้อผ้าที่ช่วยปกป้องตัวเองจากสารต่างๆ หรือในห้องข้างเคียงในกรณีที่เสื้อเปื้อนสารที่เป็นอันตราย ดังนั้นจึงต้องเตรียมห้องเปลี่ยนเสื้อผ้าเพื่อให้คนงานเปลี่ยนเสื้อผ้า ซึ่งมี 2 แบบ คือสำหรับทำงานก่อสร้างและสำหรับงานอื่นๆ ห้อง 2 แบบนี้จะต้องแยกกันอย่างชัดเจนและต้องแยกจากอ่างล้างมือและห้องอาบน้ำด้วย ตามกฎหมายของฝรั่งเศษ จะต้องแยกเป็นห้องเปลี่ยนเสื้อผ้าสำหรับผู้ชายและห้องเปลี่ยนเสื้อผ้าสำหรับผู้หญิง

3.11 ถนน ถนนที่เป็นทางผ่านสำหรับคนงานในพื้นที่ไพโรเทคนิคจะต้องมีเครื่องหมายบอก และต้องมีไฟฟ้าให้แสงสว่างในเวลากลางคืน การขนย้ายอุปกรณ์ระเบิดและชิ้นส่วนที่ไม่ได้บรรจุอยู่ในภาชนะเพื่อการขนย้ายกับสารที่ไม่ใช่สารระเบิดต้องแยกถนนกัน ยกเว้นในกรณีที่ไม่สามารถแยกได้ต้องมีการกั้นไม่ให้มีคนงานเข้ามาในบริเวณนั้น

3.12 ก๊อกน้ำ ถังเก็บน้ำและก๊อกน้ำจะต้องหาง่าย ดูแลง่าย และต้องมีวิธีการไม่ให้สารที่เป็นอันตรายตกลงไปในน้ำ การทำความสะอาดท่อ จะต้องไม่ใช้น้ำต่างชนิดไป ยกเว้นในกรณีที่ใช้ต่างกันแล้วไม่เกิดอันตราย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย