



บทที่ 1

บทนำ และ ทฤษฎี

1.1 บทนำ

สารประกอบดีบุกอินทรีย์เป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยพันธะดีบุก-คาร์บอนอย่างน้อย 1 พันธะ ค้นพบครั้งแรกในปี 1852 โดย Lowing¹ ซึ่งพันธะระหว่างดีบุก-คาร์บอนนี้จะเสถียรในน้ำและในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ณ อุณหภูมิปกติ ถ้าเปลี่ยนชนิดหรือจำนวนของหมู่อินทรีย์ที่เข้ามาต่อที่อะตอมดีบุก ก็จะมีผลทำให้คุณสมบัติของสารประกอบดีบุกอินทรีย์เปลี่ยนไป ผู้ที่ทำการศึกษาเป็นครั้งแรกคือ Sir Edward Frankland² เดเรียน โดเอซิลทิน ไดโอไอโดต์ และ เททระเอซิลทิน หลังจากนั้นได้มีการศึกษาอนุพันธ์ของ สารอินทรีย์โลหะ ของ ซิลิกอน, ดีบุก และ ตะกั่ว จนกระทั่งปลายปี 1940 การศึกษาทางดีบุกอินทรีย์ได้รับความสนใจมากเป็นพิเศษ

ปี 1960 ได้มีการรวบรวมสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่เป็นที่รู้จัก โดย Newmann³ และโดย Poller⁴ จากนั้นในช่วงปี 1970-1980 มีการพัฒนามากขึ้น โดย Gmelin⁵ รวบรวม เททระออร์แกโนทิน, ออร์แกโนทิน ไฮไดรด์, ฟลูออไรด์ และ คลอไรด์⁶, ลักษณะโครงสร้างของ สารประกอบดีบุกอินทรีย์และ X-Ray diffraction ที่ International Tin Research Institute, ประเทศอังกฤษ

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ สามารถแบ่งออกเป็น 4 พวกใหญ่ ๆ คือ เททระออร์แกโนทิน, ไตรออร์แกโนทิน, ไดออร์แกโนทิน และ โมโนออร์แกโนทิน สารเหล่านี้มีประโยชน์ในทางเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารฆ่าศัตรูพืช ศัตรูสัตว์ ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อรา ใช้ในสีทาเรือป้องกันเพรียง ใช้ในสีอื่นป้องกันราที่อาคารคอนกรีต หิน ตัวอย่างเช่น ไตรเฟนิลทิน แอซิเตต 20% ใช้กำจัดเชื้อราจากต้นข้าวโพด ซึ่งรายงานไว้โดย Farbwerke Hoechst⁷ และยังมีพบว่าสารนี้ไม่ทำลายรากของถั่วและมันฝรั่งด้วย เป็นต้น

Van der Kerk และ Luijten⁸ ได้แสดงให้เห็นว่า ไตรอัลคิลทิน ซึ่งมีรูปแบบเป็น R_3SnX (R อาจจะเป็นหมู่ที่เหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ และ X เป็นฮาโลเจน, ไฮดรอกซิล, คาร์บอกซิล หรือ ออกซิเจน) จะเป็น สารต่อต้านรา นอกจากนี้ยังพบว่า ถึงแม้จะเปลี่ยนแปลง X ใน R_3SnX ก็ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไป และ ไตร-นอร์แมล-แอลคิลทิน จะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งหรือทำลายได้ดีที่สุด และมีข้อได้เปรียบคือสารประกอบดีบุกอินทรีย์ จะสลายตัวในสภาวะ

แวดล้อมไปเป็นสารประกอบดีบุกอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารเฉื่อยที่ไม่เป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อม

การค้นพบของ Van der Kerk และ Luijten สามารถนำสารประกอบดีบุกอินทรีย์ไปใช้ประโยชน์ในทางการค้า ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อราในกระดาษ, ผ้า, สี, เนื้อไม้ และใช้ในวงการเกษตร โดยเฉพาะ สารประกอบไตรบิวทิลทิน มีความสามารถในการฆ่าเชื้อราสูง ซึ่งอนุพันธ์ของสารนี้ก็เป็นที่ยุ้จักและนิยมใช้อย่างกว้างขวางในทางอุตสาหกรรม แต่สารพวกนี้มีความสามารถในการละลายต่ำมากเช่น บิส-(ไตรบิวทิลทิน) ออกไซด์ (TBTO) จะละลายได้เพียง 0.001% น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการนำสารเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์จะต้องอยู่ในรูปของสารละลาย จึงต้องละลายในสารละลายอินทรีย์ ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง และมีปัญหาทางด้านความปลอดภัยด้วย

นอกจากสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อราแล้ว ยังพบว่า มีสารประกอบในรูปแบบของ BX_3 โดยเฉพาะกรดบอริก¹⁰ หรือ ออร์โทบอริก $B(OH)_3$ หรือเกลือที่เป็นที่ยุ้จักกันคือ บอแรกซ์ (borax) มีชื่อทางเคมีว่า โซเดียมเตตระบอเรท (sodium tetraborate) มีสูตรเคมีเป็น $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ หรือมักเรียกกันทั่วไปว่า น้ำประสานทอง มีลักษณะคล้ายผลึกรูปเข็มละลายน้ำได้ มีความเป็นกรด เป็นสารที่มีพิษ ใช้ทำน้ำกระด้างให้อ่อน ทำแก้วบางชนิด ทำสารเคลือบเครื่องปั้นดินเผา เป็นต้น กรดบอริก สามารถละลายในน้ำได้ปานกลาง และจะละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น มีสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค (antiseptic) ใช้เป็นยาล้างตา กรดบอริกจะเป็นผลึกสีขาว เมื่อละลายน้ำจะอยู่ในรูปของไอออน ดังสมการข้างล่างนี้



จะเห็นว่าโบรอนมีแนวโน้มที่อยากได้อิเล็กตรอนคู่ เพื่อที่จะให้เต็ม 4 ออร์บิทัลและเป็นไปตามกฎออกเตต ดังนั้น มันจึงทำหน้าที่เป็นเลwis แอซิด และพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอนคู่จากเบส เพื่อให้อยู่ในรูปแบบของสารประกอบที่มีพันธะเป็น เทตระโควาเลนต์ ซึ่งอะตอมโบรอนจะมีการใช้อิเล็กตรอน 8 ตัวร่วมกัน จึงจัดเป็นกรดหนึ่งโปรตอน ไม่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โบรอนสามารถเกิดพันธะคู่ได้ เช่น $RB=BR$, $RB=O$, $RB=CR_2$, $RB=NR$ ซึ่งหลักฐานแสดงถึงพันธะคู่ของ $B-X$ ในสารประกอบของรูปแบบ BX_3 ซึ่งอะตอม X จะต้องมียุ้ของอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว ซึ่งอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวนี้อาจมีส่วนร่วมในการเกิดพันธะ ซึ่งเป็นผลจาก p ออร์บิทัลเหลื่อมซ้อนทับกันระหว่าง p ออร์บิทัลของ X กับ p ออร์บิทัลที่ว่างของโบรอน แสดงในสมการข้างล่างนี้

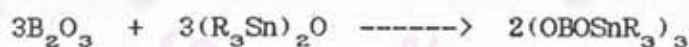
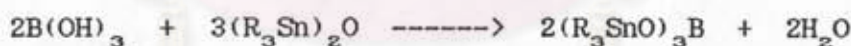


อนุพันธ์ของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งและทำลายเชื้อราได้เป็น
อย่างดีอีกชนิดหนึ่งคือสารประกอบ stannoboroxane¹¹ เป็นสารที่ประกอบด้วยพันธะ ดีบุก-
ออกซิเจน-โบรอน อย่างน้อย 1 พันธะ สารประกอบ stannoboroxane ใช้ปริมาณความเข้มข้น
น้อยมาก จะสามารถทำลายเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสารประกอบ stannoboroxane
สามารถเตรียมได้จากสารประกอบดีบุกอินทรีย์ทำปฏิกิริยากับ โบรอนเฮไลด์, กรดบอริกและบอริก-
ออกไซด์, ออร์โธบอริก เอสเทอร์ และ โบรอน ไตรแอซิเตต ได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. เตรียมจาก โบรอนเฮไลด์



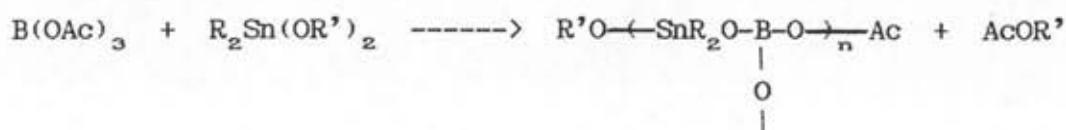
2. เตรียมจากกรดบอริกและบอริกออกไซด์



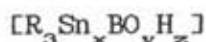
3. เตรียมจาก ออร์โธบอริก เอสเทอร์



4. เตรียมจากโบรอน ไตรแอซิเตต



ในการสังเคราะห์สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรท โดยเฉพาะที่ใช้สารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน เป็นสารตั้งต้น Gustav Weissenberger และ G.Srivastava¹² เป็นผู้รวบรวมพบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้อยู่ในรูปแบบทั่วไปดังนี้คือ



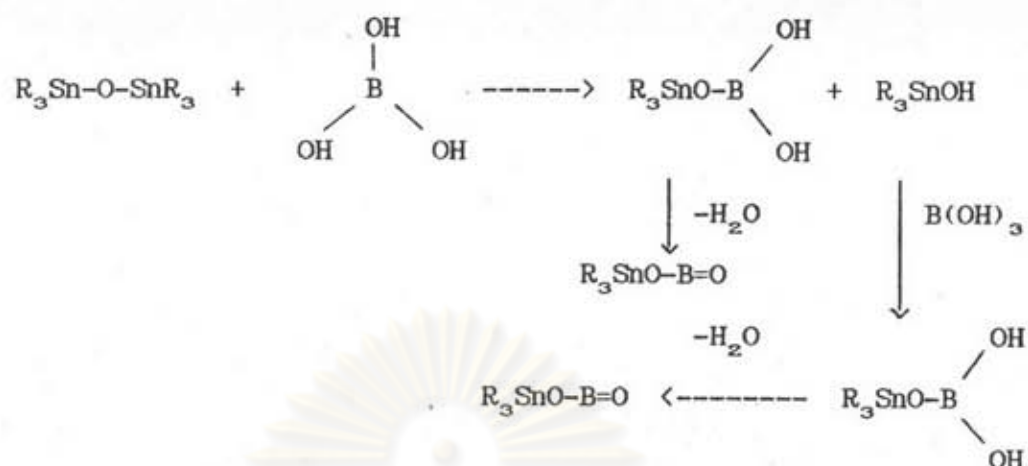
โดยที่ R เป็นหมู่แอลิฟาติก, แอโรมาติก, แอวัลลิฟาติก หรือ เฮทเทอโรไซคลิก
 x เป็นจำนวน 1 ถึง 3
 y เป็นจำนวน 2 หรือ 3
 z เป็นจำนวน 0 หรือ 1

สารประกอบที่มีสูตรพวกนี้มักจะมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อรา, แบคทีเรีย เป็นต้น ในบางครั้ง อาจจะอยู่ในรูปของ โมโนบอเรท ของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สามหมู่ เช่น $R_3SnOB=O$ หรือ โมโนบอเรท ของ บิส-(ไตรออร์แกโนทิน) เช่น $(R_3SnO)_2-B-OH$ หรือ โมโนบอเรท ของ ทริส-(ไตรออร์แกโนทิน) เช่น $(R_3SnO)_3B$ บอเรท ของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สามหมู่ เช่น ไตรออร์แกโนทิน และ บิส-(ไตรออร์แกโนทิน) ไม่ควรมีอะตอมคาร์บอนเกิน 8 อะตอม ต่อหมู่แอลคิลหนึ่งหมู่ จึงจะให้ปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มาก

สารประกอบ บิส-(ไตรออร์แกโนทิน) ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับกรดบอริก ในอัตราส่วน จำนวนโมลเป็น 1:2 จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ โมโน-(ไตรออร์แกโนทิน) บอเรท ดังสมการ



กลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



บิส-(ไตรแอลคิลทิน) ออกไซด์ มีออกซิเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่ซึ่งให้อิเล็กตรอนคู่แก่โบรอน ทำให้เกิดประจุลบ จากนั้นประจุลบจะเคลื่อนที่ไปทำให้ OH^- หลุดออกไปพร้อมกับ R_3Sn^+ ให้ R_3SnOH กับ $\text{R}_3\text{SnOB(OH)}_2$ ซึ่งเกิดการสูญเสียน้ำไปให้ $\text{R}_3\text{SnOB=O}$ ในปฏิกิริยายังมีกรดบอริก เหลืออยู่อีก 1 โมล จะเข้าทำปฏิกิริยากับ R_3SnOH โดยออกซิเจนให้อิเล็กตรอนคู่กับโบรอน ให้ $\text{R}_3\text{SnO-B(OH)}_2$ ซึ่งสูญเสียน้ำไปอีก 1 โมล ให้ $\text{R}_3\text{SnOB=O}$ ดังนั้นปฏิกิริยานี้ให้ $\text{R}_3\text{SnOB=O}$ 2 โมล และโมเลกุลน้ำ 2 โมล

ถ้าใช้ ออร์แกโนทิน ออกไซด์ 1 โมลกับกรดบอริก 1 โมลจะให้ บิส-(ไตรออร์แกโนทิน) บอเรท ดังสมการ

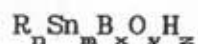


หรือใช้ ออร์แกโนทิน ออกไซด์ 3 โมล กับกรดบอริก 2 โมลจะให้ ทริส-(ไตรออร์แกโนทิน) บอเรท ดังสมการ



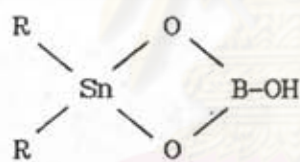
สำหรับกลไกของปฏิกิริยาก็จะคล้ายคลึงกัน

สารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับกรดบอริกในอัตราส่วนจำนวนโมลที่เหมาะสม จะให้สารผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปแบบทั่วไปดังนี้

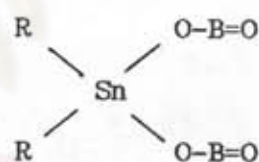


- โดยที่ R เป็นหมู่ของ แอลิฟาติก , แอโรมาติก , แอรัลลิฟาติก หรือ เฮกเทอโรไซคลิก
 n เป็นจำนวนของ 2 หรือ 3
 m เป็นจำนวนของ 1, 2 หรือ 3
 x เป็นจำนวนของ 1 หรือ 2
 y เป็นจำนวนของ 2, 3, 4 หรือ 6
 z เป็นจำนวนของ 0, 1 หรือ 2

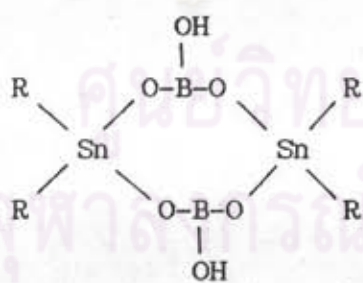
สารประกอบที่สังเคราะห์ได้อาจจะอยู่ในรูปของ โมโนเมอร์ ดังเช่น ไดออร์แกโนทินที่มีสูตรโครงสร้างเป็น (I) หรืออยู่ในรูปของ ไดเมอร์ ดังเช่น ไดออร์แกโนทินที่มีสูตรโครงสร้างเป็น (II) ไดเมอร์ จาก บิส-(ไดออร์แกโนทิน) ไดเมอร์ จาก ทริส-(ไดออร์แกโนทิน)ที่มีสูตรโครงสร้างเป็น (III) และ (IV) ตามลำดับ



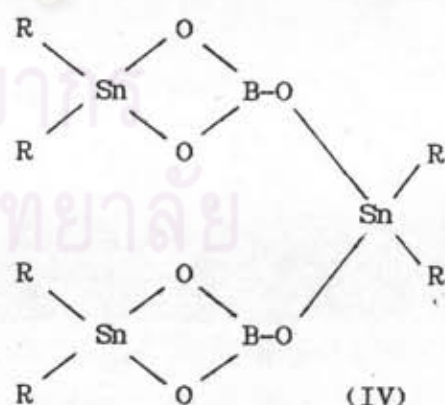
(I)



(II)



(III)



(IV)

สารประกอบที่มีสูตรโครงสร้างแตกต่างกัน เช่น อาจจะเป็นเมอร์ หรือ ไดเมอร์นั้น อาจจะได้เตรียมได้จาก ไดบิวทิลทิน , ไดเฟนิลทิน , ไดเบนซิลทิน จะให้ผลิตภัณฑ์เป็น ไดเมอร์ ของ บิส- หรือ ทริส-(ไดบิวทิลทิน) , บิส- หรือ ทริส-(ไดเฟนิลทิน) และ บิส- หรือ

ทริส-(ไดเบซิลทิน)

สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรทเหล่านี้สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ทั่วไป เช่น เฮกเซน, เฮโลจีโนไฮโดรคาร์บอน, เคโรซีน, ทอลูอีน, เบนซีน, อีเทอร์, ไดออกเซน แอซิโตน, ไซลีน, ไสโคลเฮกเซน, เมซิลเอซิล คีโตน, เมทานอล, เอทานอล, ไอโซโพรพานอล, บิวเทน ไดออล, ไดแอซิโตน, ไอโซโพรพิล อีเทอร์, เอซิลลีน ไดคลอไรด์, คาร์บอน เททระคลอไรด์, ไฮโดรจีเนเตต แนฟทาลีน, ไดเมซิล ฟอร์แมไมด์ และ ไดเมซิลซัลโฟน เป็นต้น แต่จะไม่ละลายน้ำ

สารประกอบที่อยู่ในรูปของ โมโน-, บิส- หรือ ทริส-(ไดรอร์แกโนทิน) บอเรท รวมทั้ง โมโน-, บิส- หรือ ทริส-(ไดออร์แกโนทิน) บอเรท พวกนี้จะใช้สำหรับทำลายศัตรูพืช เพื่อใช้ในการเพาะปลูกพืช ช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ทำลายพวกวัชพืช สารเหล่านี้มักใช้ในรูปแบบของ อิมัลชัน หรือ สารแขวนลอยในน้ำก็ได้ โดยนำสารประกอบบอเรท ประมาณ 0.01-0.1 % กวนกับน้ำจะให้ อิมัลชัน หรือ สารแขวนลอย

ความเป็นพิษต่อพืช¹³ และความเป็นพิษต่อเชื้อรา จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบและปริมาณสารที่กำหนดในการรักษาป้องกันพืชที่จะใช้เพาะปลูก เพื่อให้มันสามารถต่อสู้กับโรคภัยได้ ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากเชื้อราและแบคทีเรีย พบว่าสารนี้เป็นพิษต่อปลา, มด และ แมลงอื่น ๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัด ไซ่งุงได้ดี และจะเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรทบางตัวสามารถใช้ต่อต้าน ปรสิติกภายนอก บนผิวหนังของสัตว์ ใช้เป็นยารักษาทางเวชศาสตร์ และถ้านำเอาสารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรทไปใช้ร่วมกับสารอื่นที่เป็นที่รู้จักว่าใช้ในการกำจัดแบคทีเรีย, แมลง หรือ เชื้อรา ทำให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรท ยังมีประโยชน์ในแง่ของการใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอื่น ๆ ได้มากมาย เนื่องจากมีคุณสมบัติ เสถียรต่อความร้อน (Thermal stability) และ เสถียรต่อการถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolytic stability) สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรท จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่าย เมื่อทำปฏิกิริยากับ

- โพรติก รีเอเจนท์ (protic reagent)
- ไฮโดรเจน เฮไลด์ (hydrogen halide)
- แอซิล เฮไลด์ (acyl halide)
- ออร์แกโนเมทัล เฮไลด์ (organometal halide)
- ออร์โธบอเรท เอสเทอร์ (orthoborate ester)
- บอริก ออกไซด์ (boric oxide)

และเนื่องจากคุณสมบัติที่ดีของสารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเท โดยเฉพาะในทางเกษตรกรรม ในประเทศไทยยังไม่มีผู้ใดทำการสังเคราะห์ขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกทำการวิจัยสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่เป็น ไตรออร์แกโนทิน , ไดออร์แกโนทิน และ ออร์แกโนไดทิน สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่เลือกทำการวิจัยได้แก่

- ไตรเฟนิลทิน ไฮดรอกไซด์ (Ph_3SnOH)
- บิส-(ไตรบิวทิลทิน) ออกไซด์ ($(\text{Bu}_3\text{Sn})_2\text{O}$)
- ไดบิวทิลทิน ออกไซด์ (Bu_2SnO)
- ไดออกทิลทิน ออกไซด์ ((Oc_2SnO))
- 1,4-บิวทิลีน-บิส-(ไดบิวทิลทิน ออกไซด์) ($(\text{Bu}_2\text{SnBuSnBu}_2)_2\text{-O}$)
- 1,6-เฮกซิลีน-บิส-(ไดบิวทิลทิน ออกไซด์) ($(\text{Bu}_2\text{SnHexSnBu}_2)_2\text{-O}$)

สำหรับ ไตรเฟนิลทิน ไฮดรอกไซด์ , บิส-(ไตรบิวทิลทิน) ออกไซด์ , ไดบิวทิลทิน ออกไซด์ และ ไดออกทิลทิน ออกไซด์ ได้มีผู้ทำการศึกษาแล้ว แต่ที่เลือกทำการศึกษาเพื่อศึกษาเพิ่มเติมกับสมบัติอื่น ๆ ของสารประกอบเหล่านี้ อาทิ เช่น IR, ^1H , ^{13}C , ^{11}B , ^{119}Sn -NMR สเปกโตรสโคปี¹⁴⁻¹⁵, ICP อะตอมมิก อิมิสชัน และ elemental analysis สำหรับสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่เป็นออร์แกโนไดทิน คือ $(\text{Bu}_2\text{SnBuSnBu}_2)_2\text{-O}$ และ $(\text{Bu}_2\text{SnHexSnBu}_2)_2\text{-O}$ ซึ่งคาดว่าเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดบอริกในอัตราส่วนจำนวนโมลที่เหมาะสม จะให้สารผลิตภัณฑ์ที่มีพันธะ ดีบุก-ออกซิเจน-โบรอน อย่างน้อย 1 พันธะ และอาจจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งและทำลายเชื้อราได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะต้องมีการศึกษาต่อไป

1.2 ทฤษฎี

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ เป็นสารประกอบที่มีพันธะ ดีบุก-คาร์บอน อย่างน้อย 1 พันธะ โดยปกติจะมีการจัดเรียงตัวของออร์บิทัลของดีบุกเป็นแบบ sp^3 ไฮบริดเซชัน ทำให้สารประกอบมีพันธะโคเวเลนต์ของดีบุกเป็นแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ในสารประกอบดีบุกอินทรีย์จะมีคุณสมบัติค่อนข้างไปทางไอออนิก เช่น ไตรออร์แกโนทิน ไฮดรอกไซด์ จะประพฤติตัวเหมือนอินทรีย์เบส, บิส-(ไตรออร์แกโนทิน) ออกไซด์ จะประพฤติตัวเป็นเบสแก่สามารถทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์หรือ กรดอินทรีย์ แล้วจะให้เกลือที่ไม่นำไฟฟ้าและไม่ละลายน้ำ โดยปกติแล้วดีบุกจะไม่เกิดพันธะคู่กับ ออกซิเจน เช่น ไดออร์แกโนทิน ออกไซด์ จะเกิดอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมโยง (cross-linked) ขึ้นภายในโมเลกุลระหว่างดีบุก-ออกซิเจน สารประกอบดีบุกอินทรีย์เฮไลด์ จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาแทนที่เหมือนสารอินทรีย์พวกโลหะเฮไลด์ สารประกอบ

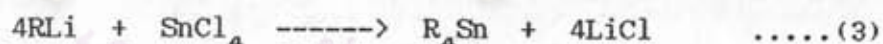
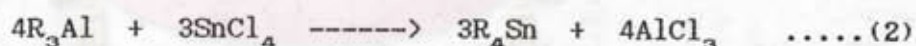
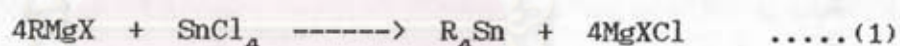
ดีบุกอินทรีย์ส่วนใหญ่จะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ และนิยมใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์อื่น ๆ

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ สามารถแบ่งออกเป็น 4 พวกใหญ่ ๆ คือ

1. เทตระออร์แกโนทิน (R_4Sn)
2. ไตรออร์แกโนทิน (R_3SnX)
3. ไดออร์แกโนทิน (R_2SnX_2)
4. โมโนออร์แกโนทิน ($RSnX_3$)

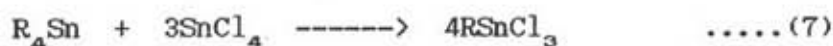
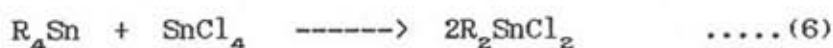
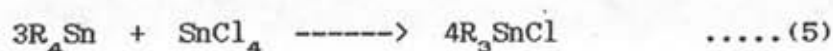
1.2.1 สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่ (Tetraorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_4Sn โดยที่ R อาจจะเป็นหมู่อัลฟาติก เช่น เมทิล, บิวทิล หรือหมู่แอโรมาติก เช่น เบนซิล เป็นต้น สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่ มีความสำคัญมากในการใช้เป็นสารตั้งต้น สำหรับเตรียมสารประกอบอื่น ๆ เช่น โมโน-, ได-, และ ไตรออร์แกโนทิน สามารถเตรียมได้จาก กรีนฮาร์ด วีเอเจนท์ หรือสารประกอบอลูมิเนียมอินทรีย์ หรือสารประกอบ ลิเทียมอินทรีย์ หรือสารประกอบ โซเดียมอินทรีย์ ทำปฏิกิริยากับ ทินเทตระคลอไรด์ ดังสมการ (1)-(4)



การสังเคราะห์สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่ ตามวิธีข้างต้น จะมีข้อจำกัดอยู่ คือ ปฏิกิริยานี้จะใช้เตรียมได้เฉพาะสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่เท่านั้น ต้องไม่มีหมู่ที่จะไปรบกวนในการเกิดปฏิกิริยาสารประกอบโลหะอินทรีย์ขณะทำปฏิกิริยาอยู่ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล, หมู่อะมิโน, หมู่ไนตริล เป็นต้น

ปฏิกิริยาที่สำคัญของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่คือ ปฏิกิริยา Kocheshkov redistribution เพราะเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เตรียมสารประกอบดีบุกอินทรีย์สามหมู่, สองหมู่ และหนึ่งหมู่ ดังสมการ (5)-(7)



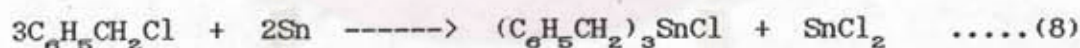
สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่ ส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์

1.2.2 สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สามหมู่ (Triorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_3SnX โดยที่ R อาจจะเป็นหมู่อัลคิล หรือ หมู่ออลิล ส่วน X อาจจะเป็น เฮไลด์, ออกไซด์, ไฮดรอกไซด์, คาร์บอกซิเลต เป็นต้น สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยา Kocheshkov redistribution ดังสมการ (5)

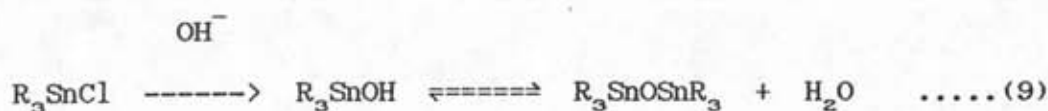


นอกจากนี้อาจจะสังเคราะห์ได้โดยตรงจากสารประกอบอินทรีย์เฮไลด์ทำปฏิกิริยากับโลหะดีบุก ซึ่งวิธีนี้ใช้ได้เฉพาะการเตรียม ไดเบนซิลทิน คลอไรด์ เท่านั้น ดังสมการ (8)



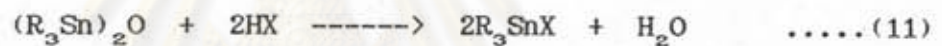
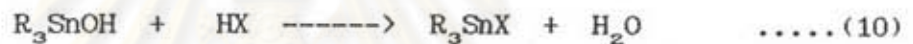
ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้ดีต้องมีน้ำเป็นตัวทำละลายอยู่ด้วย ถ้าใช้ทอลูอีนเป็นตัวทำละลายจะได้สารประกอบของ ไดเบนซิลทิน ไดคลอไรด์ แทน

สารประกอบดีบุกอินทรีย์เฮไลด์ จะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับสารละลายน้ำของ โซเดียม, โพตัสเซียม หรือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สามหมู่ ดังสมการ (9)



ปฏิกิริยานี้ทำได้โดยการเขย่าสารละลายอีเทอร์ของสารประกอบ ไตรแอลคิลทิน เฮไลด์ กับสารละลายน้ำของโซเดียม, โพตัสเซียม หรือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ถ้าสารประกอบ ไตรแอลคิลทิน เฮไลด์ เป็นของเหลวจะให้อีเทอร์ออกมา หรือเป็นของแข็ง ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ จะต้องให้ความร้อน ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้น ถ้าหมู่ R เป็นหมู่ใหญ่สารประกอบ ไตรแอลคิลทิน ไฮดรอกไซด์ ที่สังเคราะห์ได้จะไม่เกิดการสูญเสียน้ำไปเป็น บิส-(ไตรแอลคิลทิน) ออกไซด์ ยกเว้นสารประกอบของ ไตรเมทิลทิน ซึ่งมีความเสถียรต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เพราะ สารประกอบไฮดรอกไซด์ของ ไตรแอลคิลทิน ที่เกิดขึ้นไม่เสถียรที่อุณหภูมิห้อง จะเกิดการสูญเสีย น้ำไปเป็น บิส-(ไตรแอลคิลทิน) ออกไซด์ แทน

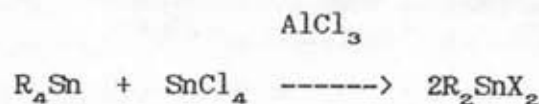
สารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน ไฮดรอกไซด์ และ ออกไซด์ มีฤทธิ์เป็นด่างสามารถ ทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีฤทธิ์เป็นกรดได้ ดังสมการ (10)-(11)



ปฏิกิริยาข้างต้นนี้มีประโยชน์ในการเตรียมอนุพันธ์ที่มีประจุลบจากสารประกอบคลอไรด์ ในกรณีที่ไม่สามารถเตรียมจากปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ที่ชอบนิวเคลียส (Nucleophile) ได้

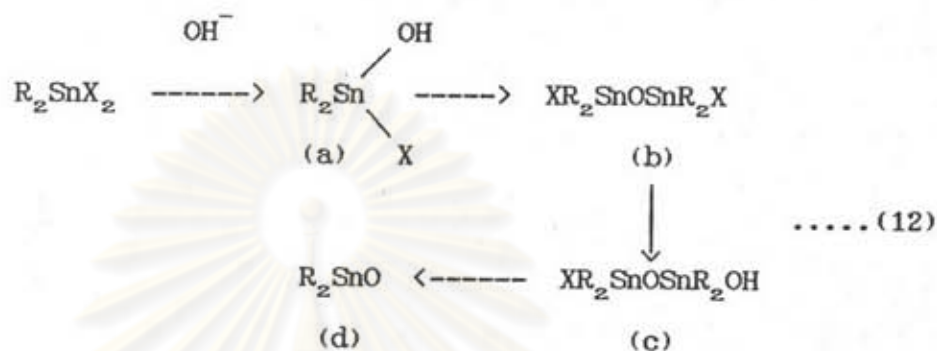
1.2.3 สารประกอบไดออร์แกโนทินที่มีหมู่อินทรีย์สองหมู่ (Diorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_2SnX_2 โดย R อาจจะเป็นหมู่อัลคิล หรือ หมู่ออลวิล ส่วน X จะเป็นพวก เฮไลด์, ออกไซด์, ไฮดรอกไซด์, คาร์บอกซิเลต เป็นต้น เตรียมได้จากปฏิกิริยา Kocheshkov redistribution ระหว่าง เททระออร์แกโนทิน กับ ทิน เททระคลอไรด์ โดยมี อลูมิเนียม ไตรคลอไรด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ



หรืออาจจะสังเคราะห์โดยตรงจากโลหะดีบุก กับ สารประกอบอินทรีย์เฮไลด์ โดยใช้ ทองแดงหรือ สังกะสีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์สูง

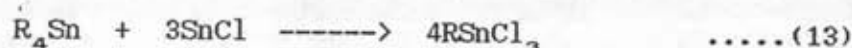
สารประกอบไดไฮไลด์ของ ไดออร์แกโนทิน จะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับสารละลาย น้ำของโซเดียม, โพตัสเซียม หรือ แอมโมเนียมคลอไรด์ให้ ออกไซด์ ของสารประกอบ ไดออร์แกโนทิน ดังสมการ (12)



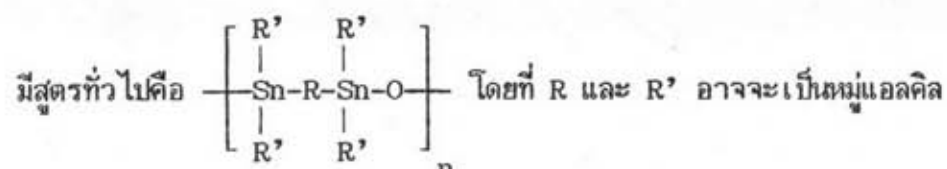
สารประกอบ ไดแอลคิลทิน ไฮดรอกไซด์ เฮไลด์ (a) สามารถแยกออกได้เมื่อ R เป็นหมู่ใหญ่ หมู่ R ที่มีขนาดใหญ่จะป้องกันการเกิด distannoxane (b) และ (c) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้สารประกอบ ไดแอลคิลทิน ไดไฮดรอกไซด์ ซึ่งเมื่อมีการสูญเสียน้ำให้ ไดแอลคิลทิน ออกไซด์ (d)

1.2.4 สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์หนึ่งหมู่ (Monoorganotin compounds)

มีสูตรทั่วไปคือ R_nSnX_3 โดยที่ R อาจจะเป็นหมู่อัลคิลหรือหมู่ออลวิล ส่วน X จะเป็นพวกเฮไลด์, ออกไซด์, ไฮดรอกไซด์, คาร์บอกซิเลต เป็นต้น เตรียมได้จากปฏิกิริยา Kocheshkov redistribution ของสารประกอบ เทตระออร์แกโนทิน กับ ทิน เทตระคลอไรด์ ดังสมการ (13) หรือเตรียมจาก ไดออร์แกโนทิน ไดไฮไลด์ กับ ทิน เทตระคลอไรด์ ดังสมการ (14)



1.2.5 สารประกอบออร์แกโนไดทิน (Organoditin compounds)



หรือแอลซิลก็ได้ สามารถเตรียมได้จากไดกอินซาร์ต ทำปฏิกิริยากับ ไดแอลคิลทิน ไดไฮไลด์
 ดังสมการ (15)



จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้พอลิเมอร์ที่มีตึบทุกเป็นองค์ประกอบ
 ดังสมการ (16)

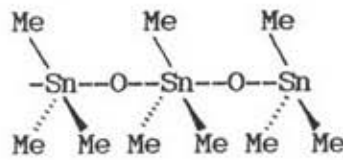


สารประกอบพวกนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นของแข็ง มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนัก

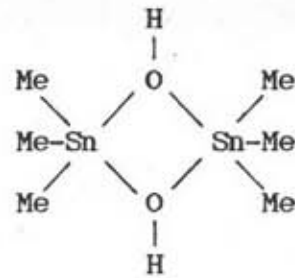
1.2.6 คุณสมบัติของสารประกอบตึบทุกอินทรีย์

สารประกอบตึบทุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สี่หมู่ ส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์เหมือนกับ ไดรอร์แกโนทิน ไฮไลด์ ชกเวน ไตรเมซิลทิน คลอไรด์ $(CH_3)_3SnCl$ ที่สามารถละลายน้ำได้และ ไดรอร์แกโนทิน ฟลูออไรด์ ที่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เพราะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่าง ตึบทุก-ฟลูออไรด์สูงมาก

ผลึกของ ไตรเมซิลทิน ไฮดรอกไซด์ หมู่ OH เกือบทั้งหมดจะอยู่เป็นสามเหลี่ยมระนาบ¹⁶ (planar) ตั้งโครงสร้างแบบ (V) แต่ถ้าอยู่เป็นสารละลายจะเกิดเป็นไดเมอร์¹⁷ ตั้งโครงสร้างแบบ(VI)



(V)



(VI)

ไตรเอซิล-, ไตรโพรพิล- และ ไตรบิวทิลทิน ไฮดรอกไซด์ เป็นของแข็งคล้ายขี้ผึ้ง มีจุดหลอมเหลวต่ำ ไตรแอลคิลทิน ไฮดรอกไซด์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะเป็นน้ำมัน ไตรเอริลทิน ไฮดรอกไซด์ จะเป็นของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูง เมื่อให้ความร้อนประมาณ 80-110 °C จะเกิดการสูญเสียน้ำ เช่น ไตรเฟนิลทิน ไฮดรอกไซด์ จะเปลี่ยนเป็น ออกไซด์¹⁸ โดยปกติทั้ง ไตรเอริลทิน ไฮดรอกไซด์ และ บิส-(ไตรเอริลทิน) ออกไซด์ สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ และสามารถแยกออกจากกันได้โดยใช้ Karl Fischer titration¹⁹

สารประกอบดีบุกอินทรีย์โดยเฉพาะ ไตรแอลคิลทิน ไฮดรอกไซด์ จะเป็นของแข็ง จะเป็นต่างที่อ่อนกว่าสารประกอบของเมอร์คิวรี, ทลเลียมและตะกั่ว ไตรเอซิลทิน ไฮดรอกไซด์ และ ไอโซ-โพรพิลทิน ไฮดรอกไซด์ จะเป็นเบส แต่ ไตรเฟนิลทิน ไฮดรอกไซด์ มีสมบัติเป็นกรด สำหรับสารประกอบ ออร์แกโนทิน ออกไซด์ เป็นของแข็งทั้งหมด จะไม่หลอม แต่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง โดยปกติไม่ละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป ถึงแม้ว่าสูตรทั่วไปของสารประกอบ ออร์แกโนทิน ออกไซด์ เหล่านี้จะเขียนอยู่ในรูปของ R_2SnO แต่โครงสร้างที่แท้จริงอาจมีมากกว่า 1 หมู่ ซึ่ง Solerio²⁰ พบว่า R_2SnO ที่มีหมู่ R เป็นหมู่ใหญ่จะเป็นแบบโมโนเมอร์ เช่น $C_{12}H_{25}-$ แต่ถ้าหมู่ R เป็นหมู่เล็กจะเป็นแบบพอลิเมอร์ นอกจากนี้สารประกอบ ออร์แกโนทิน ออกไซด์ จะมีความเป็นเบสลดลง เมื่อมีออกซิเจนเพิ่มขึ้นเรียงลำดับดังนี้

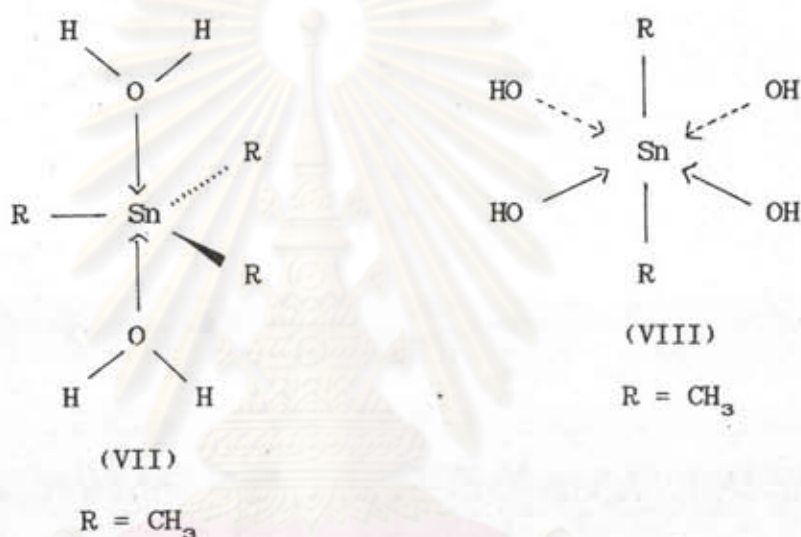


การศึกษาธรรมชาติของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ มักศึกษาในรูปของสารละลาย ส่วนใหญ่พิจารณาจาก เมซิลทิน เพราะสารประกอบดีบุกอินทรีย์อื่น ๆ ไม่สามารถละลายน้ำได้มากพอ การละลายน้ำของสารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน สามารถแสดงดังตาราง 1

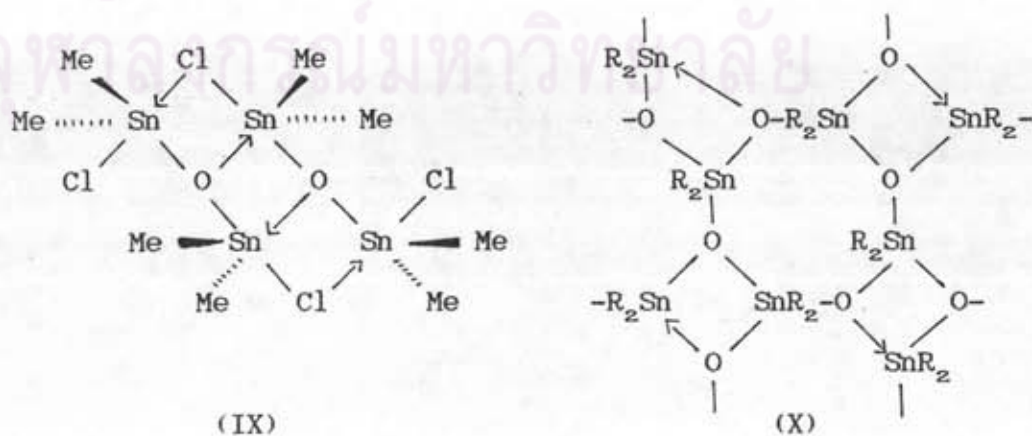
R ₂ SnX	Solubility (mg dm ⁻³)
(C ₂ H ₅) ₂ SnOH	~ 35 000
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	7500
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	50
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	50
i-(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	25
(C ₂ H ₅) ₂ SnF	6
(C ₂ H ₅) ₂ SnF	4.5
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	50
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	17†
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	16
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	5.4
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	256†
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	65†
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	50
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	16
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	6.4
(C ₂ H ₅) ₂ SnOCOCH ₃	5
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	19.5†
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	18†
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	8
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	8-10
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	3
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ O	1.4
((C ₂ H ₅) ₂ Sn) ₂ S	<1
(C ₂ H ₅) ₂ SnSO ₃ CH ₃	~ 31 000†
(C ₂ H ₅) ₂ SnSO ₃ C ₂ H ₅	~ 29 000†
(C ₂ H ₅) ₂ SnF	1.2
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	5.2
(C ₂ H ₅) ₂ SnCl	<1
(C ₂ H ₅) ₂ SnOH	1.2†

ตาราง 1 แสดงการละลายของสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีหมู่อินทรีย์สามหมู่

โดยปกติ การละลายของสารประกอบ ไตรแอลคิลทิน จะลดลงเมื่อความยาวโซ่ของหมู่แอลคิลเพิ่มขึ้น เช่น $\text{Bu}_3\text{SnOSnBu}_3$ ซึ่งไอออนมีแนวโน้มสูงในการรวมตัวกับน้ำ สารประกอบไตรเมทิลทิน ในสารละลายมี $\text{pH} < 5$ ในลักษณะที่เป็น ไตรเมทิลทิน แคทไอออน $(\text{CH}_3)_3\text{Sn}^+$ และจะมี pH สูงขึ้นเมื่อเป็น $(\text{CH}_3)_3\text{SnOH}$, ไตรเมทิลทิน แคทไอออน จะแสดงการไฮเดรชัน มีรูปร่างแบบ trigonal bipyramid กับอะตอมติดกับ ดังรูป (VII) และสารประกอบในสารละลายมี $\text{pH} < 4$ จะอยู่ในรูปของ ไดเมทิลทิน แคทไอออน $(\text{CH}_3)_2\text{Sn}^{2+}$ ดังรูป (VIII)



สารประกอบออกไซด์ของ ไดออร์แกโนทิน จะมีผลึกหลายรูปแบบ หรือเป็นอสัณฐาน สามารถเกิดเป็นพอลิเมอร์ได้ง่าย จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 200°C ซึ่งโครงสร้าง²¹ ของสารประกอบพวกนี้อาจจะอยู่ในรูปของวง (IX) หรือโซ่กันเป็นแบบร่างแห (X)



สารประกอบออกไซด์ของ โมโนออร์แกโนทิน อาจจะเป็นของแข็งที่มีจุดเดือดต่ำ หรือ อาจจะเป็นของเหลว ขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในน้ำหรืออากาศขึ้น และการปลดปล่อยหมู่ไฮโดรเจน หรือเฮไลด์ออกจากโมเลกุล ส่วนใหญ่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ หรือน้ำที่มีความเป็นกรดสูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

1.2.7 ประโยชน์ของสารประกอบดีบุกอินทรีย์

สารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน มีความสำคัญมาก ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารประกอบดีบุกอินทรีย์อื่น ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น โมโน-, ได- และ ไตรออร์แกโนทิน นอกจากนี้อาจนำไปใช้ในตัวเร่งปฏิกิริยาของ Ziegler-Natta²² ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์

ในปี ค.ศ. 1950 ได้มีผู้นำสารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน มาใช้เป็นยาปราบชีวภาพ (Biocide) แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเพื่อนำสารประกอบของ ไตรออร์แกโนทิน²³ มาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายมากขึ้น นอกจากจะนำไปใช้เป็นยาปราบชีวภาพแล้วยังนำไปใช้เป็นยาฆ่าเชื้อเนื้อไม้ กำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อนในทะเล ใช้เป็นยาปราบศัตรูพืช ศัตรูสัตว์ที่เฉพาะเจาะจงกับสิ่งที่ต้องการต่อต้าน ความเข้มข้นที่ใช้ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสัตว์อื่น สลายตัวในบรรยากาศ เป็นสารเฉื่อยไม่ก่อปัญหาให้กับสิ่งแวดล้อม สารประกอบ ไตรออร์แกโนทินที่นำมาใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้แก่ ไตรเมซิลทิน ใช้เป็นยาฆ่าแมลง, ไตรโพรนิล-, ไตรบิวทิล-, ไตรเพนิลทิน ใช้เป็นยาปราบวัชพืช และ แบคทีเรีย, ไตรไซโคลเฮกซิลทิน ไฮดรอกไซด์ ใช้ปราบแมลง, ไรต์ตอมผลไม้, บิส-(ไตรบิวทิลทิน) ออกไซด์ ใช้รักษาเนื้อไม้ ป้องกันเชื้อรา, แมลง, มอดกัดกินเนื้อไม้ ใช้ละลายเพียง 1-2% ในตัวทำละลายอินทรีย์ และใช้ในสีทาเรือ จะต่อต้าน เพรียง

สารประกอบ ไดออร์แกโนทิน ไดคลอไรด์ มีความสำคัญมากเพราะใช้เป็นสารมัธยันต์ในการสังเคราะห์อนุพันธ์อื่น ๆ ของสารประกอบ ไดออร์แกโนทิน โดยอาศัยปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยหมู่ที่ชอบนิวเคลียส

สารประกอบ ไดออร์แกโนทิน มีประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น ใช้เป็นสารทำให้เสถียร (stabilizer) ในการผลิตพลาสติกชนิด พี.วี.ซี ไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนทั้งในกระบวนการผลิต (180-200 องศาเซลเซียส) และในขณะที่ใช้งานกลางแดด พี.วี.ซี เป็นพลาสติกที่ใช้กันอย่างกว้างขวางตั้งแต่ทำภาชนะ, ท่อ, ร่องเท้าและส่วนประกอบของอาคาร ในประเทศไทย บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ผลิต พี.วี.ซี เรซินปีละกว่าหนึ่งแสนตัน นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่ง

Application	Compound
	<u>R₂SnX</u>
Agriculture (fungicides) (antifeedants) (acaricides)	(C ₆ H ₅) ₂ SnX (X = OH, OAc) (C ₆ H ₅) ₂ SnX (X = OH, OAc) (<i>o</i> -C ₆ H ₄) ₂ SnX (X = OH, - $\overline{\text{N.C=N.C=N}}$) $\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{---} \end{array}$
	(C ₆ H ₅ (CH ₃) ₂ CCH ₂) ₂ Sn ₂ O
Antifouling paint biocides	(C ₆ H ₅) ₂ SnX (X = OH, OAc, F, Cl, SCS.N(CH ₃) ₂ , OCOCH ₂ Cl, OCOC ₂ H ₄ N-3) (C ₆ H ₅) ₂ SnOCOCH ₂ CBr ₂ COOSn(C ₆ H ₅) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ SnX (X = F, Cl, OAc) ((C ₆ H ₅) ₂ Sn) ₂ O (C ₆ H ₅) ₂ SnOCOCH ₂ CBr ₂ COOSn(C ₆ H ₅) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ SnOCO(CH ₂) ₂ COOSn(C ₆ H ₅) ₂ (-CH ₂ C(CH ₃)(COOSn(C ₆ H ₅) ₂)-) _n
Wood preservative fungicides	((C ₆ H ₅) ₂ Sn) ₂ O (C ₆ H ₅) ₂ Sn(naphthenate) (C ₆ H ₅) ₂ Sn) ₂ PO ₄
Stone preservation	((C ₆ H ₅) ₂ Sn) ₂ O
Disinfectants	(C ₆ H ₅) ₂ SnOCOC ₂ H ₅ ((C ₆ H ₅) ₂ Sn) ₂ O
Molluscicides (field trials)	(C ₆ H ₅) ₂ SnF ((C ₆ H ₅) ₂ Sn) ₂ O
	<u>R₂SnX₂</u>
Heat and light stabilizers for rigid PVC	R ₂ Sn(SCH ₂ COO- <i>i</i> -C ₆ H ₁₁) ₂ (R = CH ₃ , C ₆ H ₅ , C ₆ H ₁₁ , (C ₆ H ₅)OCOCH ₂ CH ₃) (R ₂ SnOCOCH=CHCOO) _n (R = C ₆ H ₅ , C ₆ H ₁₁) (C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCOCH=CHCOOC ₆ H ₁₁) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCOC ₁₁ H ₂₃) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ Sn(SC ₁₁ H ₂₃) ₂
Homogeneous catalysts for RTV silicones, polyurethane foams and transesterification reactions	(C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCOCH ₃) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCO ^o C ₆ H ₁₁) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCOC ₁₁ H ₂₃) ₂ (C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCOC ₁₁ H ₂₃) ₂ ((C ₆ H ₅) ₂ SnO) _n
Precursor for forming SnO ₂ films on glass	(CH ₃) ₂ SnCl ₂
Anthelmintics for poultry	(C ₆ H ₅) ₂ Sn(OCOC ₁₁ H ₂₃) ₂

ตาราง 2 แสดงการนำสารประกอบดีบุกอินทรีย์ ไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม

ปฏิกิริยาในการผลิตโพลีซิริเทน ได้แก่ ไตบิวทิลทิน ไดออกไซด์, ไตบิวทิลทิน ไดลอเรต เป็นต้น ซึ่งขบวนการนี้มี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรก โพลีไกลคอลอีเธอร์ ทำปฏิกิริยากับ ทอลูอิน ไดไอโซไซยาเนต เกิดเป็นพอลิเมอร์ของซิริเทน ซึ่งมีปลายเป็นหมู่ ไอโซไซยาเนต ซึ่งพร้อมจะทำปฏิกิริยาต่อ ขั้นที่สอง เติมน้ำลงไปจะทำปฏิกิริยากับหมู่ ไอโซไซยาเนต กลายเป็นหมู่ซิริเทน เชื่อมต่อกันซึ่งในขบวนการนี้ จะเกิด คาร์บอนไดออกไซด์ จะมีผลต่อการยึดตัวของซิริเทน หรือ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์โฟมเบากระดาน และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์พิกเมนต์ของเอสเทอร์บางตัวที่ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก, น้ำมันหล่อลื่น

สารประกอบ โมโนออร์แกโนทิน มีคุณสมบัติเป็นกรดแก่ สามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนีย และ เอมีนได้ มีความสำคัญในการเป็นสารมัธยस्थ สำหรับเตรียมสารประกอบ โมโนออร์แกโนทินตัวอื่น ๆ นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวทำให้เกิดความเสถียรในพลาสติกพวก พี.วี.ซี โดยให้ผลดีกว่าการใช้สารประกอบ ไดแอลคิลทิน เพราะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าประมาณ 5-20% โดยน้ำหนักและยังสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของ พี.วี.ซี ในขบวนการผลิตได้อีกด้วย เนื่องจากมันสามารถทำหน้าที่ได้ดี และรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำ และยังใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวแก้ว เครื่องเคลือบดินเผา ทำให้แก้วและเครื่องเคลือบดินเผามีความแข็งแรง แม้จะมีเนื้อบางเบา ก็ไม่แตกละเอียดง่าย ทำให้กระจกนำไฟฟ้าใช้ในงานเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้กระจกกันความร้อนในการก่อสร้าง เป็นต้น

1.2.8 ความเป็นพิษของสารประกอบดีบุกอินทรีย์

โดยปกติ สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่ต่ออยู่กับหมู่อินทรีย์ต่าง ๆ ในรูปแบบ $R_n SnX_{4-n}$ มีอยู่เป็นจำนวนมากความเป็นพิษขึ้นอยู่กับจำนวนหมู่และชนิดของหมู่ R โดยเฉพาะ $n = 3$ เช่น สารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน (R_3SnX) ได้แก่ ไตรเมทิลทิน มีความเป็นพิษต่อแมลง และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม, ไตรเอทิลทิน จะเป็นพิษสูงสุดต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ไตรโพรพิลทิน จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดแกรมลบ (gram-negative bacteria) ความเป็นพิษของสารประกอบดีบุกอินทรีย์เหล่านี้จะค่อย ๆ มีพิษลดลงเมื่อหมู่แอลคิลมีขนาดสายโซ่ของโมเลกุลยาวขึ้น และมีหมู่ที่มีประจุลบมาต่อ สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีรูปร่างเป็นแบบ 5-โคออร์ดิเนต จะมีพิษน้อยกว่ารูปร่าง 4-โคออร์ดิเนต ตัวอย่างสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่เป็นพิษ ดังแสดงในตาราง 3

Species	R in most active R _n SnX compound
Insects	CH ₃
Mammals	C ₂ H ₅
Gram neg. bacteria	n-C ₁ H ₇
Gram pos. bacteria, fish, fungi, molluscs, plants	n-C ₄ H ₉
Fish, fungi, molluscs	C ₆ H ₁₃
Fish, mites	<i>cyclo</i> -C ₆ H ₁₁ , C ₆ H ₅ (CH ₃) ₂ CCH ₃

ตาราง 3 แสดงสารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่เป็นพิษ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารประกอบ ไตรออร์แกโนทิน นี้ความเป็นพิษของมันขึ้นอยู่กับหมู่อินทรีย์ที่มาต่อกับดีบุก หมู่ที่มีพิษมากที่สุดคือ ไตรเมทิล- และ ไตรเอทิลทิน รองลงมาคือ ไตรนโบไฟล ไตรออกทิลทิน ซึ่งจะมีผลระคายเคืองต่อตาและผิวหนัง จากการศึกษาในสัตว์พบว่า สารประกอบ ไตรบิวทิลทิน และ ไตรเฟนิลทิน จะทำลายระบบคอร์แนลของตาและทำให้เนื้อเยื่อตาเป็นแผลไหม้พองจึงไม่ควรให้สารประกอบเหล่านี้สัมผัสตา หรือผิวหนังเป็นเวลานาน ๆ

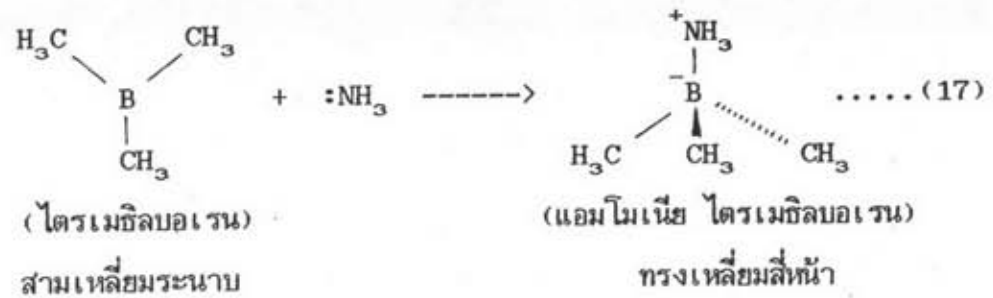
สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่มีการศึกษาถึงความเป็นพิษกันมาก ก็คือ สารประกอบดีบุกอินทรีย์ที่ใช้ในการเกษตรกรรม เช่น ไตรบิวทิลทิน จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (gram-positive bacteria) อนุพันธ์ของ ไตรบิวทิล-, ไตรเฟนิล-, ไตรไซโคลเฮกซิลทิน จะมีความเป็นพิษสูงต่อปลาและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ นอกจากนี้พบว่า ไตรเฟนิลทิน ไฮดรอกไซด์ จะมีผลระคายเคืองอย่างรุนแรงกับกระต่าย แต่จะไม่ระคายเคืองผิวหนังที่แห้ง แต่ จะไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหมด

ส่วนสารประกอบ ไดออร์แกโนทิน จะมีความเป็นพิษน้อยกว่าสารประกอบของ ไตรออร์แกโนทิน พบว่าความเป็นพิษของสารประกอบคลอไรด์และออกไซด์ของ ไดออร์แกโนทิน จะลดลง เมื่อหมู่อินทรีย์ ที่ต่อกับดีบุกมีความยาวสายโซ่ของโมเลกุลยาวขึ้น การที่สารประกอบ ไดออร์แกโนทิน ที่มีหมู่อินทรีย์ขนาดเล็ก มีความเป็นพิษมาก เนื่องจากมันสามารถรวมตัวกับเอ็นไซม์ได้และยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารที่ก่อให้เกิดพลังงานในเซลล์ได้

สารประกอบ โมโนออร์แกโนทิน เท่าที่พบในปัจจุบัน ไม่ค่อยมีความเป็นพิษมากนักและแนวโน้มของความเป็นพิษจะลดลงเมื่อความยาวสายโซ่โมเลกุลของหมู่แอลคิลยาวมากขึ้น

1.2.9 สารประกอบโบรอน

โบรอนมี 3 อิเล็กตรอนที่ใช้ในการก่อพันธะโควาเลนต์ในรูปแบบของ sp^2 ของสารประกอบ BX_3 เช่น โบรอน ไตรฟลูออไรด์ (BF_3) , ไตรเมทิลบอเรน $B(CH_3)_3$ และ กรดบอริก ($B(OH)_3$) จะเห็นว่าโบรอนมีแนวโน้มที่อยากได้อิเล็กตรอนคู่เพื่อที่จะให้เต็ม 4 ออร์บิทัลและเป็นไปตามกฎออกเตต โบรอน เฮไลด์ และ ออร์แกโนบอเรน จึงเป็นเลwis แอซิดพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอนคู่จากเบสเพื่อให้สารประกอบโบรอนที่มีพันธะเป็น เททระโควาเลนต์ ซึ่งอะตอมของโบรอนจะมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 8 อิเล็กตรอน ดังสมการ (17)



การเปลี่ยนแปลงคอนฟิเกอเรชันของโบรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาข้างต้นนี้ จะทำให้สารประกอบโบรอนที่มีพันธะเป็น เททระโควาเลนต์ มีรูปร่างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ในขณะที่สารประกอบโบรอนที่มีพันธะเป็น ไดวาเลนต์ จะมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมระนาบ (planar)

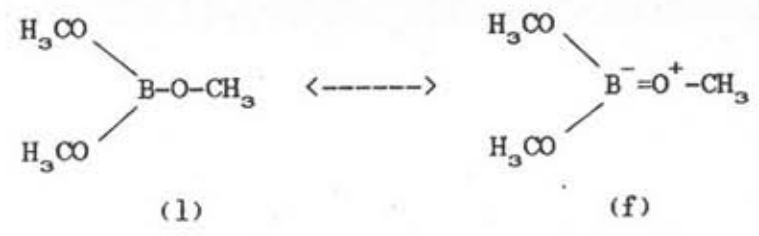
การระบุไฮบริดเซชันที่แน่นอนทำได้ยากเพราะมีหลายปัจจัยเป็นตัวกำหนดความเสถียรของโมเลกุล จะเห็นได้จากตัวอย่างของสารประกอบฟลูออรีน เช่น โบรอนไตรฟลูออไรด์มีอันดับพันธะมากกว่า 1 เพราะเกิดพันธะคู่และสภาพไฟฟ้าบวกอยู่ที่ F แม้ว่าจะขัดกับหลักความจริงที่ว่า F มีค่า สภาพไฟฟ้าลบมาก มีโครงสร้างเรโซแนนซ์เป็น



โมเลกุลที่อะตอมสามารถขยายชั้นวาเลนซ์ออกไปมากกว่าออกเตต จะไม่สามารถทำนายโครงสร้างได้ เพราะมีแฟคเตอร์ต่าง ๆ มาเกี่ยวข้อง ได้แก่

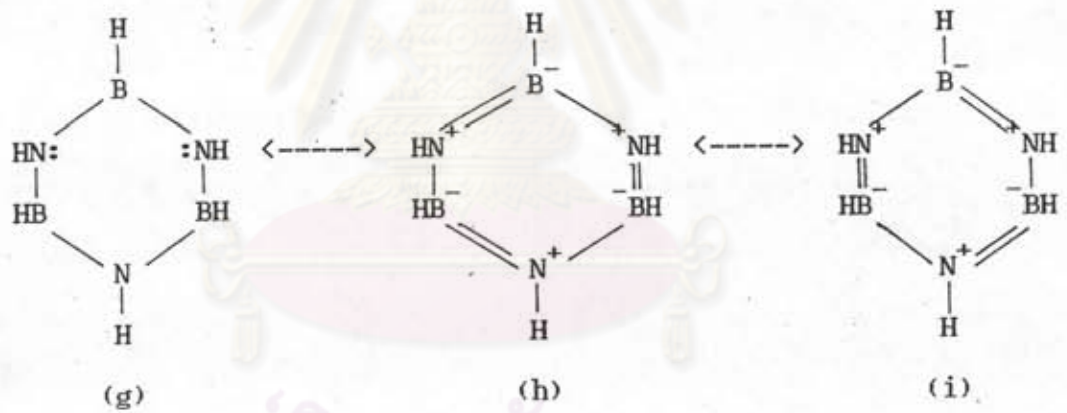
- ขอบเขตการใช้ออร์บิทัล p และ d ในการเกิดพันธะพาย
- ไฮบริดเซชันของออร์บิทัลที่เกี่ยวข้องกับออร์บิทัล d มีพลังงานสูง
- อิทธิพลของอะตอมที่ติดต่อ

ตัวอย่างข้างล่างแสดงให้เห็นถึงบทบาทของแฟคเตอร์เหล่านี้ต่อการบ่งบอกรูปร่างของสาร เช่น ไตรเมทอกซิโบรอน มีโครงสร้างเรโซแนนซ์เป็น



โบรอน ต่ออยู่กับอีกสามอะตอม โดยใช้ออร์บิทัลไฮบริด sp^2 มุมระหว่างพันธะเป็น 120° ในแบบ (l) ออกซิเจนใช้ออร์บิทัลไฮบริด sp^3 แต่ในแบบ (f) ออกซิเจนจะใช้ออร์บิทัลไฮบริด sp^2 และใช้ออร์บิทัล p_z ในการเกิดพันธะคู่

นอกจากนี้อาจจะเกิดในรูปของ $\text{RB}=\text{BR}$, $\text{RB}=\text{O}$, $\text{RB}=\text{CR}_2$ และ $\text{RB}=\text{NR}$ เช่น (โบราซีน) มีอะตอมของโบรอนและไนโตรเจน^{2,4} อยู่สลับกัน ซึ่งคล้ายกับเบนซีนที่มี 6 อิเล็กตรอนเหมือนกัน แต่พวกนี้จะมีอิเล็กตรอน 1 คู่ ซึ่งสามารถ เคลื่อนที่ ได้

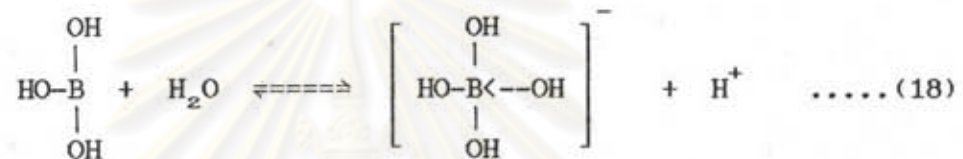


ความคล้ายคลึงของเบนซีน และ โบราซีน สามารถเห็นได้ชัดจาก Kekule-type โครงสร้าง (h) และ (i) พบว่าโมเลกุลของ โบราซีน มีลักษณะเป็นวงระนาบ (planar ring) ที่มีมุมพันธะเป็น 120° และความยาวพันธะของ (d) ระหว่างโบรอน-ไนโตรเจน เป็น 1.44 \AA สำหรับพันธะเดี่ยวของโบรอน-ไนโตรเจน จะมีความยาวพันธะ 1.36 \AA ซึ่งยาวกว่าที่คำนวณได้ แต่ข้อมูลเหล่านี้ยังไม่ครอบคลุมขอบเขตทั้งหมดได้ทำให้ยังไม่ยอมรับ

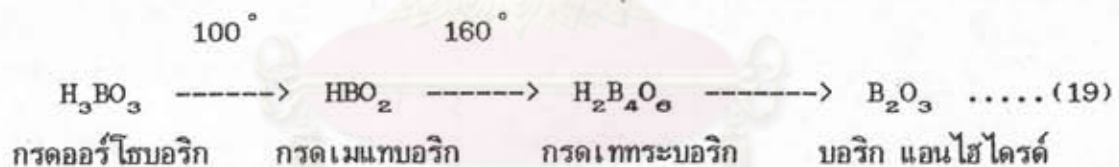
โบรอนไตรเฮไลด์ (BX_3) ที่มี X เป็น ฟลูออไรด์, คลอไรด์, โบรไมด์ และไอโอดีน จะเป็นโมเลกุลโครงสร้างทั้งสิ้น ในโบรอนไตรเฮไลด์จะมีอิเล็กตรอนเพียง 6 ตัวรอบอะตอมโบรอน โมเลกุลจะมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมระนาบ (planar) และอยู่เดี่ยวในสถานะก๊าซ จัดเป็นเลwis แอซิด สามารถรับอิเล็กตรอนคู่จากเลwis เบสได้ ในน้ำ BCl_3 จะไฮโดรไลซ์ให้กรดบอริกกับ HCl

แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากสารประกอบโควาเลนต์ไปเป็นไอออนในสารละลายน้ำ เรามักใช้ไฮโดรเจนโบรอนเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาของสารอินทรีย์ เพราะมันสามารถลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาได้

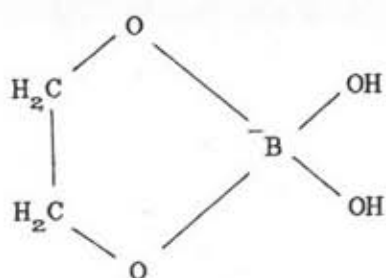
กรดบอริก จะไม่มีสี มีลักษณะเป็นเกล็ด ละลายได้พอประมาณในน้ำ และจะละลายมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าที่อุณหภูมิ 12 องศาเซลเซียส จะละลาย 4.01 กรัมในน้ำ 100 กรัม และที่อุณหภูมิ 100 ° C จะละลายได้ 39.95 กรัมในน้ำ 100 กรัม เมื่ออยู่สภาพที่เป็นสารละลายจะเป็นกรดที่อ่อนมาก และส่วนใหญ่จะไอออไนซ์เป็น กรดโมโนบอริก ดังสมการ (18)



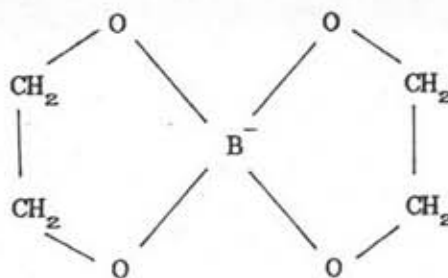
กรดบอริกจะสลายตัวเพื่อให้ กรดเมแทบอริก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส, ให้กรดเททระบอริก ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และให้ โบรอน ไตรออกไซด์ ที่ความร้อนสูง ดังสมการ (19)



กรดออร์โทบอริก เป็นสารที่สำคัญและมีความเสถียรเช่นเดียวกับ เมแท- และ กรดเททระบอริก จะเป็นของแข็งที่เสถียร กรดบอริกพร้อมที่จะเปลี่ยนไปเป็นแอลคิลหรือเอริล ออร์โทบอเรท $\text{B}(\text{OR})_3$ โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และกรดซิลฟูริก สารประกอบบอเรทที่เกิดขึ้นโดยปกติแล้วเป็นของเหลวที่ไม่มีสี ถ้ากรดบอริกทำปฏิกิริยากับ พอลิไฮดรอกซี แอลกอฮอล์ หรือ กรดคาร์บอกซิลิก ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ต่ออยู่ในลักษณะ ซิส- ในอัตราส่วน 1:1 หรือ 1:2 จะให้ สารเชิงซ้อนคีเลต ที่เสถียรมากเป็นแบบโครงสร้าง (j) และ (k)



(j)



(k)

สารประกอบเชิงซ้อนบอแรก จำนวนมากมีพื้นฐานโครงสร้างเป็น triangular ของหน่วย BO_3 ดังนั้น โซเดียม เมแทบอแรก $(Na^+)_3B_3O_6^{3-}$ และ แคลเซียม เมแทบอแรก $(Ca^{2+})_2B_2O_4^{2-}$ จะมี บอแรก แอนไอออน เป็นโครงสร้างแตกต่างกัน

1.2.10 การเตรียมสารประกอบดีบุกอินทรีย์บอแรก

สารประกอบดีบุกอินทรีย์ ทำปฏิกิริยากับ โบรอน ไตรไฮไลด์ , ออร์โธบอริก เอสเทอร์ , โบรอน ไตรแอซิเตต และกรดบอริก ให้สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอแรก จำนวนมาก โดยเฉพาะกรดบอริก สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบชนิดต่าง ๆ ที่มีพันธะ M-X (M = Si, Sn และ Ge; X = H, Cl, OH และ OR) แบ่งออกเป็น 5 พวกคือทำปฏิกิริยา

1.2.10.1 ออร์แกโนเมทัล ไฮโดรด์

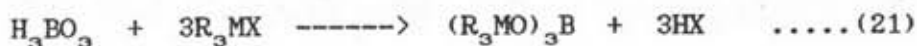
ไตรแอลคิลสเตนเนน ทำปฏิกิริยากับกรดบอริกที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยานี้จะต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น นิกเกิล (Ni) หรือ แพลแลเดียม ไฮไลด์ ดังสมการ (20)



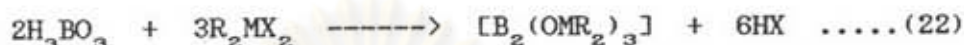
ในตอนแรก boroxyl oxygen จะเข้าที่อะตอมโลหะก่อนตามด้วยการ กำจัดไฮโดรเจน

1.2.10.2 ออร์แกโนเมทัล ไฮไลด์

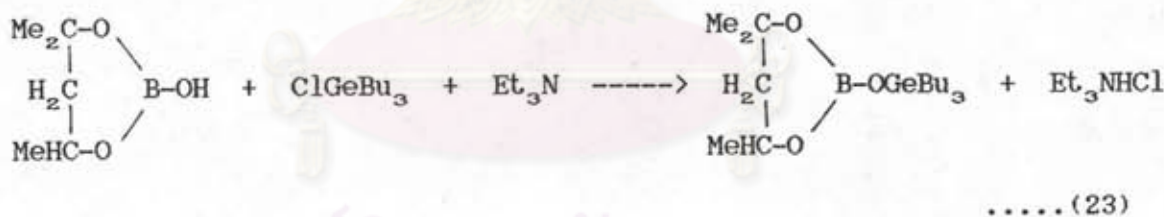
ไตรแอลคิลเมทัล ไฮไลด์ ทำปฏิกิริยากับกรดบอริก จะได้ผลิตภัณฑ์สูง แต่จะทำให้ปริมาณเพิ่มขึ้นได้โดยการรีฟลักซ์นาน ๆ ดังสมการ (21)



แต่ถ้าทำปฏิกิริยากับ ไดแอลคิลเมทิล ไดไฮไดด์ จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ ดัง
สมการ (22)



ปฏิกิริยาของ เฮกซิลีน ไฮโดรเจน บอเรท กับ ไตรนิวทิลคลอโรเจอร์แมน กับ
ไตรเอซิล แอมีน สามารถเกิดขึ้นได้ดังสมการ (23)

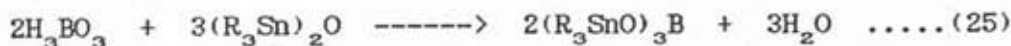


1.2.10.3 ออร์แกโนเมทัลลิก ไฮดรอกไซด์ และ ออกไซด์

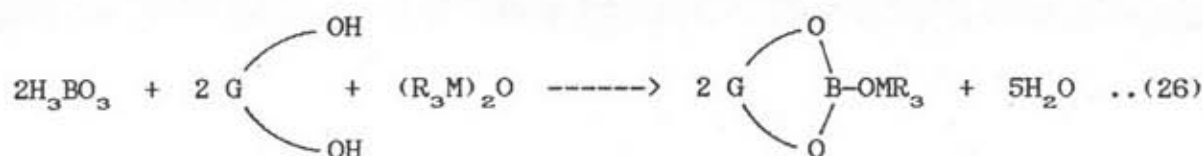
ไตรแอลคิลทิน ไฮดรอกไซด์²⁵⁻²⁶ และ ออกไซด์ ทำปฏิกิริยา
กับกรดบอริก จะเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ ดังสมการ (24)-(25)



และ

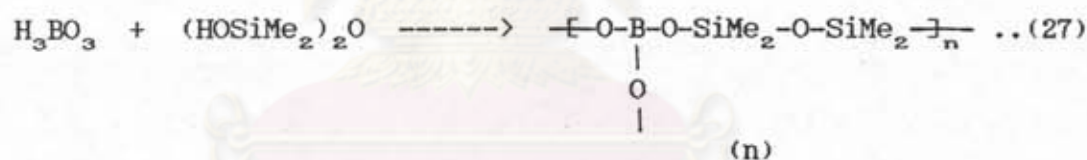


ถ้าในปฏิกิริยามี ไกลคอล อยู่ด้วย จะให้สารผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างจากเดิม ดังสมการ (26)



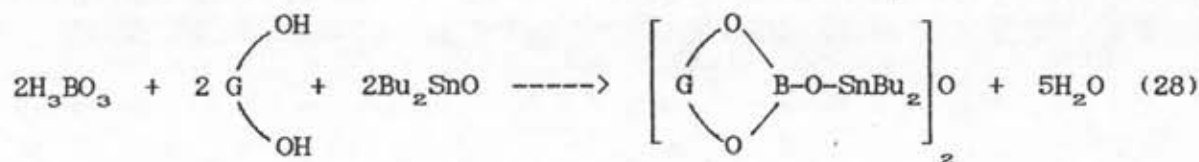
จากปฏิกิริยาข้างต้นนี้ ถ้า M เป็นอะตอมดีบุก ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีกว่า M ที่เป็นอะตอมของเจอร์เมเนียม และซิลิกอน เช่น บิส-(ไตรแอลคิลทิน) ออกไซด์ หรือ ไตรแอลคิลทินไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับกรดบอริกในเบนซีน รีฟลักซ์ธรรมดาจะให้ ทริส-(ไตรแอลคิลทิน)บอเรท ในขณะที่ บิส-(ไตรเมทิลซิลิล) ออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับ บอริก ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 350 °C ให้ ทริส-(ไตรเมทิลซิลิล) บอเรท เพียง 20% เท่านั้น และ ไพโรบอเรท ของเฮกซิลีน ไกลคอล ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับคืนมาได้หลังจากรีฟลักซ์ด้วย บิส-(ไตรเมทิลซิลิล) ออกไซด์ เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง

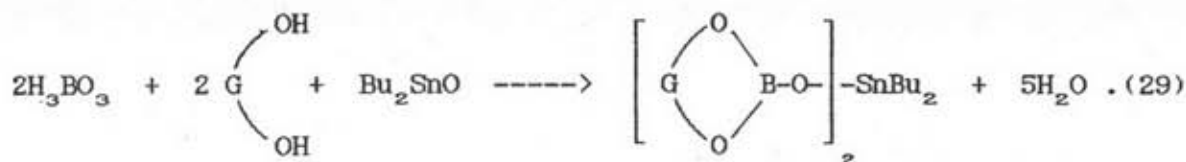
เททระเมทิลไดไฮโดรเจน-1,3-ไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยากับกรดบอริก ให้พอลิเมอร์ของบอโรไฮโดรเจน (n) ดังสมการ (27)



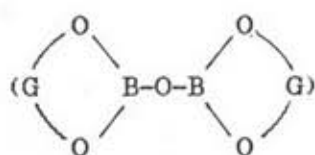
ไดเมทิลพอลิไฮโดรเจน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำปฏิกิริยากับกรดบอริกที่อุณหภูมิ 150-200 องศาเซลเซียส สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกโพลีเมอร์ไรซ์ และแสดงคุณสมบัติ "bouncing putty"

ไดบิวทิลทิน ออกไซด์²⁷⁻²⁸ จะทำปฏิกิริยากับกรดบอริกจะให้ ไดบิวทิลทิน บอเรท ดังสมการ (28)-(29)





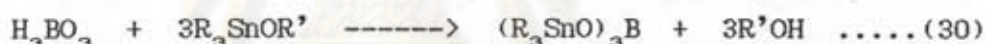
ปฏิกิริยา (28) และ (29) ในตอนแรกจะเกิดเป็น แอลคิลีน ไฟโรบอเรท



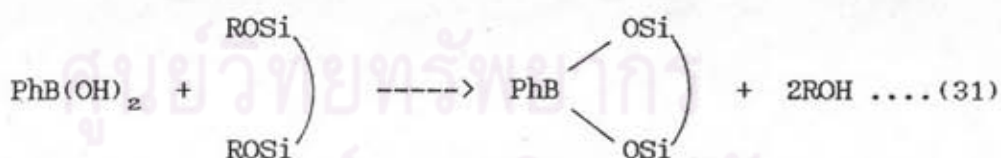
ก่อนแล้วจึงจะทำปฏิกิริยากับ ไดนิวทิลทิน ออกไซด์ ในผลิตภัณฑ์ข้างต้น

1.2.10.4 ออร์แกโนเมทัล แอลคอกไซด์ (Organometal alkoxides)

ไตรแอลคิลทิน แอลคอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับกรดบอริกในอัตราส่วนจำนวนโมลที่เหมาะสม โดยมี กรดพารา-ทอลูอิน ซิลโฟนิค เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ (30)

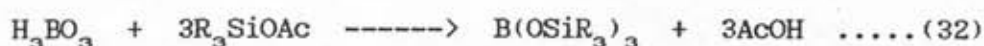


นอกจากนี้ Adrianov และผู้ร่วมงานของเขา²⁹ ได้ขยายรูปแบบสมการข้างต้นเป็นกรดเฟนิลบอริก ทำปฏิกิริยากับ ไดแอลคอกซีไซเลน ดังสมการ (31)



1.2.10.5 ออร์แกโนเมทัล แอซิเตต (Organometal acetates)

Voronkov³⁰ ได้พบปฏิกิริยาของ แอซิทอกซีไซเลน กับกรดบอริก ให้ผลิตภัณฑ์ ทริส-(ไตรแอลคิลซิลิล) บอเรท ดังสมการ (32)



1.2.10.6 คุณสมบัติของสารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรท

การศึกษาพันธะดีบุก-ออกซิเจน-โบรอน ใช้ยืนยันลักษณะของสารที่สังเคราะห์ได้ ความว่องไวของปฏิกิริยาต่อรีเอเจนต์ต่าง ๆ ได้เริ่มมีการค้นคว้าบ้างแล้ว คุณสมบัติที่สำคัญคือ

A) ความเสถียรต่อความร้อน (Thermal stability)

อนุพันธ์ของสารประกอบ ไตรแอลคิลทิน บอเรท จะไม่เกิดการสลายตัวง่าย ๆ ไปเป็น บอริก ออกไซด์ กับ นิส-(ไตรแอลคิลทิน) ออกไซด์ ดังสมการ (33)

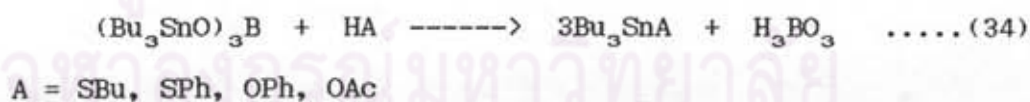


B) ความเสถียรต่อการไฮโดรไลซ์ (Hydrolytic stability)

จะเหมือนกับ เมทัล แอลคอกไซด์, เมทัลโลบอโรเซน จะถูกไฮโดรไลซ์ในความชื้นได้ง่าย สารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรทก็จะถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายเช่นเดียวกับสารประกอบดีบุกอินทรีย์บอเรทสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารอื่น ๆ ได้มากมาย เช่น จะทำปฏิกิริยากับ

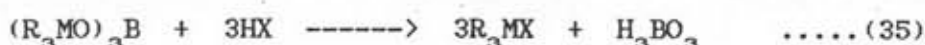
- โพรติก รีเอเจนต์ (protic reagent)

ปฏิกิริยาของ ทริส-(ไตรบิวทิลสแตนนิล) บอเรท กับ ไฮดรอกซีฟีนอล และ กรดแอซิติค ในเบนซีน จะเป็นไปตามสมการ (34)



- ไฮโดรเจน แฮไลด์ (Hydrogen halide)

พันธะระหว่าง M-O-B พร้อมทั้งจะแตกออกเมื่อทำปฏิกิริยากับ HX ดังสมการ (35)



M = Si, Sn

- เอซิล เฮไลด์ (Acyl halide)

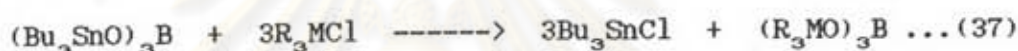


ในรูปแบบของปฏิกิริยาข้างต้น อะตอมของธาตุที่มีค่าสภาพไฟฟ้าลบสูงกว่าจะเข้าหาอะตอมที่บวก

- ออร์แกโนเมทัล เฮไลด์ (Organometal halide)

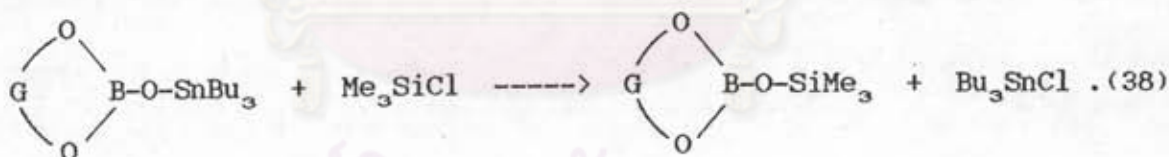
สแตนิล บอเรท พร้อมทั้งจะแตกออกโดยทำปฏิกิริยากับ

ไตรแอลคิลฮาโลไซเลน และ เจอร์แมน

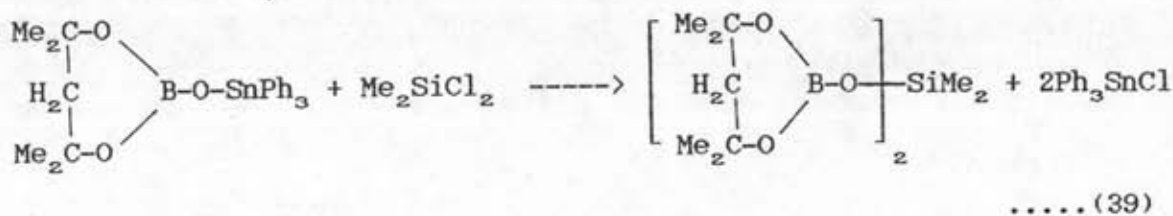


M = Si, Ge

วิธีนี้ก่อให้เกิดประโยชน์ในการสังเคราะห์ 2-ไตรเมทิลไซโลซี-1,2,3-ไดออกซา-บอโรเลน และ บอริเนน ชนิดต่าง ๆ ดังสมการ (38)

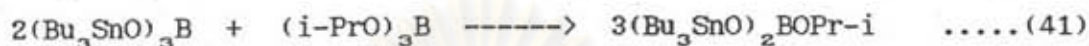
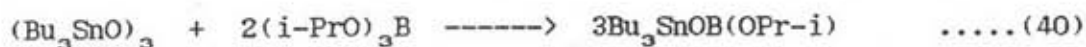


และใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์อนุพันธ์ บิส-บอโรซี ซึ่งเป็นของเหลวสามารถกลั่นแยกได้



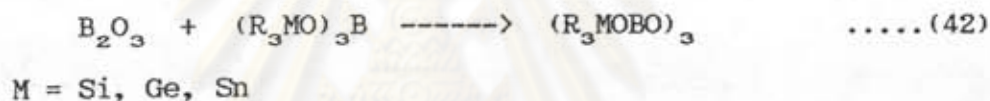
- ออร์โธโบรเอท เอสเทอร์ (Orthoborate ester)

เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เช่น ทริส-(ไดริวทิลทิน) โบรเอท และ ไอโซโพรพิล โบรเอท



- บอริก ออกไซด์ (Boric oxides)

แอสตนินิล-, เจอร์เมิล-, และ ซิลิล ออร์โธโบรเอท ทำปฏิกิริยากับ บอริก ออกไซด์ จะเปลี่ยนเป็น เมทาโบรเอท ดังสมการ



- ปฏิกิริยาสอดแทรก (Insertion reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้พันธะดีบุก-ออกซิเจน แตกออก แต่สาเหตุที่ไม่แตกที่พันธะ โบรอน-ออกซิเจน ก็เนื่องจากว่าพันธะของดีบุก-ออกซิเจน จะมีขั้วมากกว่า ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการ

