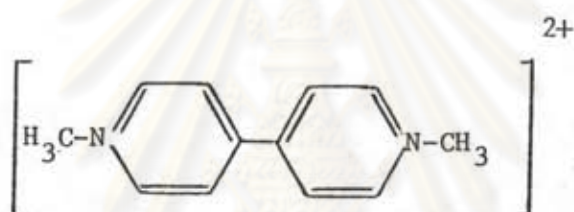




2.1 ประวัติความเป็นมา

พาราควอท (paraquat) เป็นสารกำจัดวัชพืช (herbicide) อยู่ในกลุ่มของไบไพริโดเลียม (Bipyridylium herbicides) ที่สำคัญที่สุด มีชื่อทางเคมีว่า 1,1'-ไดเมทิล-4,4'-ไบไพริโดเลียม แคตไอออน (1,1'-Dimethyl-4,4'-bipyridylium cation) โดยทั่วไปมักจะอยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์หรือเกลือซัลเฟต มีสูตรโครงสร้างดังนี้



พาราควอทเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการค้นคว้าของบริษัท ไอ.ซี.ไอ. แห่งประเทศอังกฤษ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1882 และได้ถูกนำออกจำหน่ายเพื่อใช้ในการกำจัดวัชพืชในปี ค.ศ. 1962 โดยใช้ชื่อทางการค้าต่าง ๆ ซึ่งต่อมาได้เป็นที่รู้จักและใช้กันแพร่หลายในประเทศต่าง ๆ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สาธารณรัฐเยอรมันตะวันตก แคนาดา ออสเตรเลีย ญี่ปุ่น มาเลเซีย เป็นต้น สำหรับประเทศไทยก็มีการใช้สารพาราควอทเป็นจำนวนมาก และชื่อขายกันในท้องตลาดภายใต้ชื่อทางการค้าต่าง ๆ กัน เช่น กริมมอกโซน แกรมมาโซน คาราโซน ซุปเปอร์โซน โทนาโซน ไบโอโซน พาราควอท ม็อกคาโซน รูด้า อากาโซน เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์พาราควอทของไอ.ซี.ไอ. ที่ผลิตออกเป็นการค้าโดยทั่วไปประกอบด้วย สารออกฤทธิ์ (พาราควอทไดคลอไรด์) ในปริมาณ 276 กรัม ค่อน้ำ 1 ลิตร หรือเทียบเท่ากับปริมาณพาราควอทไอออน 200 กรัมค่อน้ำ 1 ลิตร นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปดังกล่าวยังประกอบด้วย สารเพิ่มกลิ่น สารเคมีที่ทำให้เกิดสี และสารกระตุ้นให้เกิดการอาเจียนผสมรวมอยู่เพื่อเป็นการเพิ่มมาตรการความปลอดภัยในผลิตภัณฑ์ด้วย

เนื่องจากพาราควอทเป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีประสิทธิภาพสูง มีฤทธิ์การทำลายอย่างรวดเร็ว เกษตรกรจึงนิยมใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย เพราะใช้ในปริมาณน้อยแต่ได้ผลดี สามารถแสดงให้เห็นได้จากสถิติการนำเข้าของฝ่ายวัสดุมีพิษตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 ถึงปี พ.ศ. 2526 (18) มีปริมาณดังนี้

ปี พ.ศ.	ปริมาณการนำเข้า (เมตริกตัน)	คิดเป็นเงิน (ล้านบาท)
2523	2800.00	112.66
2524	4055.53	167.55
2525	3123.37	146.11
2526	1237.68	78.65

โดยพาราควอทถูกจัดอยู่ในอันดับสามของการนำเข้าของสารกำจัดวัชพืชในประเทศ ดังนั้นรัฐบาลจึงอนุญาตให้ตั้ง โรงงานอุตสาหกรรมผลิตพาราควอทขึ้นภายในประเทศได้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526

2.2 การสังเคราะห์พาราควอท (Method of Synthesis)

พาราควอทเตรียมได้จากไพริดีน (pyridine) ทำปฏิกิริยากับไอโซไซเตียมในแอมโมเนียเหลว เรียกปฏิกิริยานี้ว่า "ไดเมอร์ไรเซชัน" (Dimerization) ให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ 4,4'-ไบไพริดีนียม แล้วทำปฏิกิริยา "ควอเตอร์ไนเซชัน" (Quarternization) ให้เป็นเกลือคลอไรด์ด้วยเมทิลคลอไรด์ (CH_3Cl) จะได้ 1,1'-ไดเมทิล-4,4'-ไบไพริดีนียม ไดคลอไรด์, (I) หรือเป็นเกลือซัลเฟตด้วยไดเมทิลซัลเฟต ($(\text{CH}_3)_2\text{SO}_4$) จะได้ 1,1'-ไดเมทิล-4,4'-ไบไพริดีนียม บิสเมทิลซัลเฟต, (II) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (19)

- จุดหลอม เหลว $175 - 180^{\circ}\text{C}$ และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 230°C
- ความถ่วงจำเพาะ $1.24-1.26$
- ลักษณะทางกายภาพ เป็นผลึกแข็งสีขาว ูดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นก่อนนำมาใช้ในการวิเคราะห์ต้องอบที่อุณหภูมิประมาณ 110°C เพื่อให้แห้งเสียก่อน
- ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ที่ 20°C

ตัวทำละลาย	ความสามารถในการละลาย
อะซีโตน	ละลายได้น้อยมาก
คาร์บอนไดซัลไฟด์	ไม่ละลาย
ไดเมทิลฟอร์มาไมด์	ละลายได้เล็กน้อย
เอทานอล	ละลายได้น้อยมาก
เคโรซีน	ไม่ละลาย
น้ำ	ละลายดีมาก

จะเห็นว่าพาราควอทละลายได้ดีในน้ำ แต่ละลายน้อยมากถึงไม่ละลายเลยในตัวทำละลายอินทรีย์

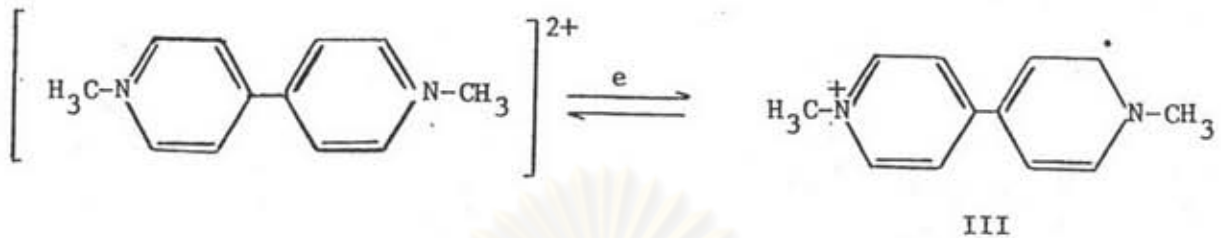
2.4 สมบัติทางเคมีของพาราควอท (Chemical properties)

โดยทั่วไปปฏิกิริยาเคมีของพาราควอทก็เหมือนกับสารประเภท Alkyl pyridylum cation ทั้งหมดแต่ปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญของพาราควอทมีดังนี้

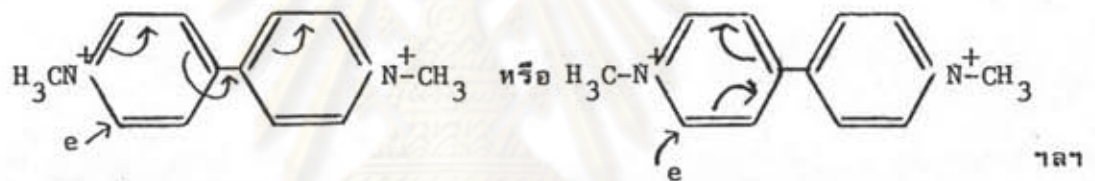
2.4.1 ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction)

เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญของพาราควอทที่นำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ ทั้งนี้เพราะพาราควอทสามารถถูกรีดิวซ์ได้โดยง่าย โดยใช้รีดิวซ์เชิงเอเจนต์ที่มีความสามารถปานกลาง เช่น โลหะสังกะสี (Zn) หรือโซเดียมไดไฮโอไนต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) ในสารละลายที่เป็นเบส ปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจะเป็น 2 ขั้นตอนคือ

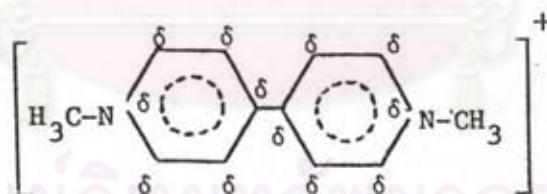
1. ขั้นตอนแรก จะเป็นปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนตัวเดียว (single electron reduction) (22) ซึ่งจะเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นแรดิคัลอิสระประจุบวก (free radical cation), III ดังสมการต่อไปนี้



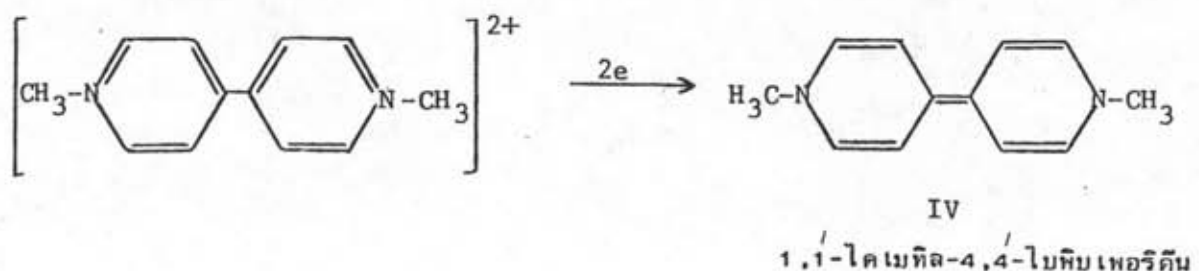
และแรดิคัลอิสระประจุบวกที่เกิดขึ้นนี้ มีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของ UV-Visible แต่จะเสถียรในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้เพราะอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่โมเลกุลของแรดิคัลอิสระนั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ (delocalize) ไปได้ทั่วทั้งโมเลกุลดังกล่าว (mechanism) ต่อไปนี้ (23)



ซึ่งอาจเขียนโครงสร้างของแรดิคัลอิสระประจุบวกดังนี้



2. ขั้นตอนที่ 2 เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยารีดักชันมากกว่า 2 ชั่วโมงขึ้นไป ผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนเป็นอีกตัวหนึ่งคือ 1,1'-ไดเมทิล-4,4'-ไบพิเพอริดีน (1,1'-Dimethyl-4,4'-bipiperidine), IV ดังสมการ

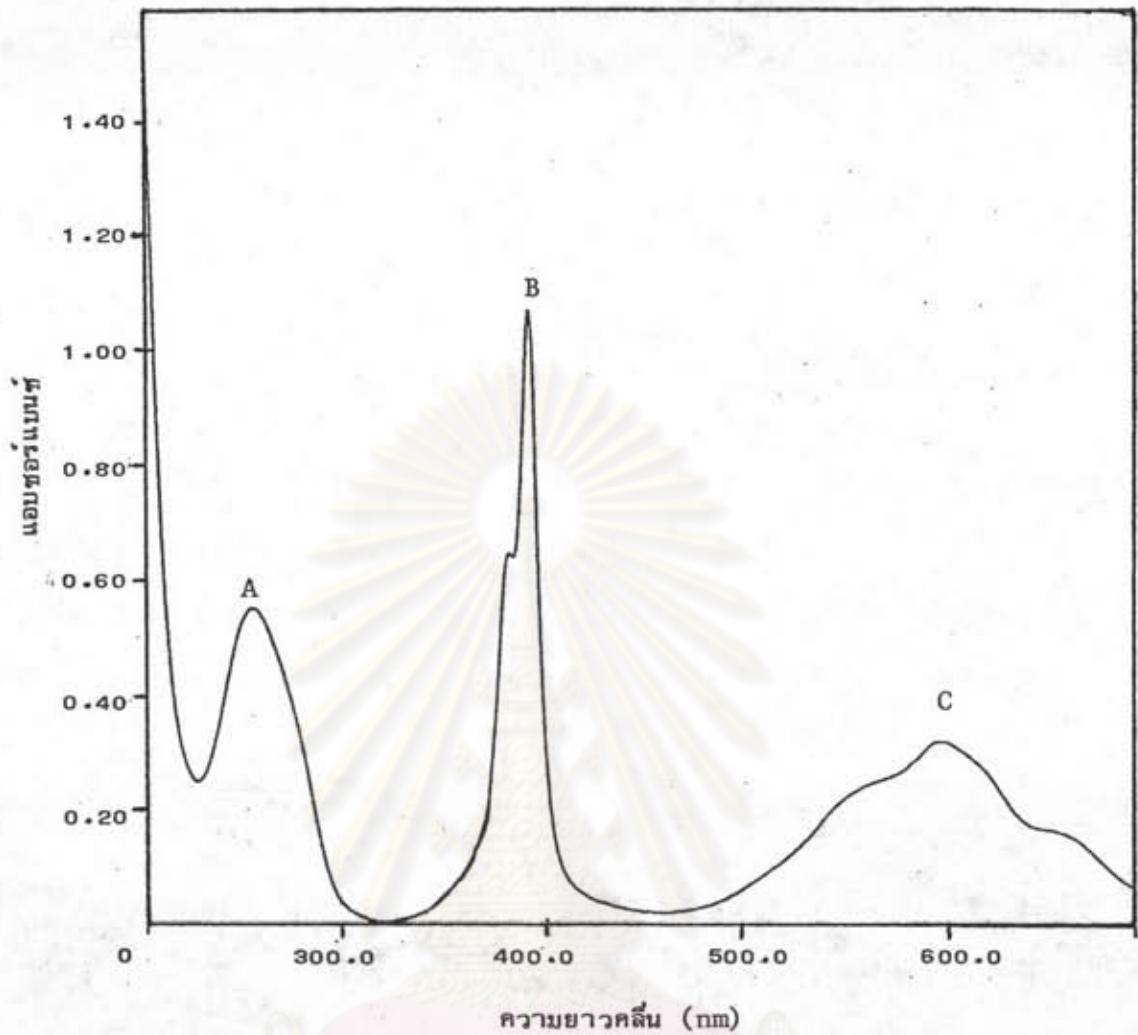


ปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนตัวที่ 2 นี้ เป็นปฏิกิริยาแบบไม่ผันกลับ (Irreversible reaction) และโครงสร้าง IV นี้ไม่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกับโครงสร้าง III ได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้สมบัติการดูดกลืนแสงบอกความแตกต่างของโครงสร้าง III และ IV ได้ โดย III จะให้สีน้ำเงินภายหลังการรีดิวซ์และดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 396 และ 600 nm มีค่าโมลาร์แอบซอร์ปติวิตี, Σ (Molar absorptivity) เท่ากับ 38,000 และ 9,000 $\text{โมล}^{-1} \cdot \text{เซนติเมตร}^{-1} \cdot \text{ลิตร}$ (6) ตามลำดับ

ดังนั้นเทคนิคทางสเปกโตรโฟโตเมตรีจึงสามารถนำมาใช้ในการทำคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์ของพาราควอตได้ โดยที่ความยาวคลื่น 396 nm จะให้ Absorption band ที่เข้มและเด่นชัดมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Absorption band ที่ความยาวคลื่น 600 nm

นอกจากนี้พาราควอตในรูปแบบของโคแคตไอออนก็สามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 257 nm และมีค่าโมลาร์แอบซอร์ปติวิตี, Σ เท่ากับ 4,770 $\text{โมล}^{-1} \cdot \text{เซนติเมตร}^{-1} \cdot \text{ลิตร}$ Absorption spectra ของพาราควอตที่ความยาวคลื่น 257, 396 และ 600 nm มีลักษณะดังรูปที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แสดง UV-VIS Absorption spectra ของสารละลายพาราควอตมาตรฐาน เข้มข้น 1.00 ppm

A สารละลายพาราควอตเข้มข้น 1.00 ppm

B และ C สารละลายพาราควอตเข้มข้น 1.00 ppm รีตีวซ์ด้วยสารละลาย

โซเดียมไดไธโอนีตชั้น 0.20% (นน./ปริมาตร) ในสารละลาย

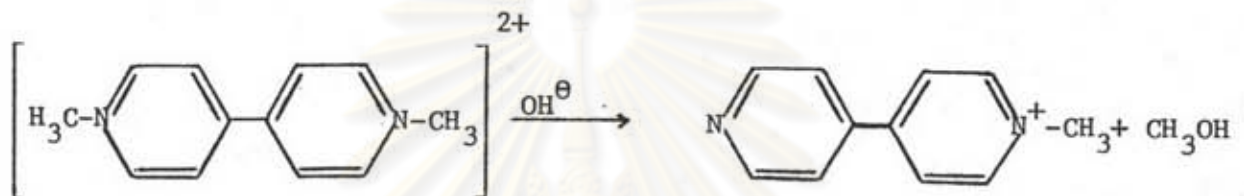
โซเดียมไฮดรอกไซด์ชั้น 0.50 โมล/ลิตร

2.4.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของพาราควอต (Degradation reaction)

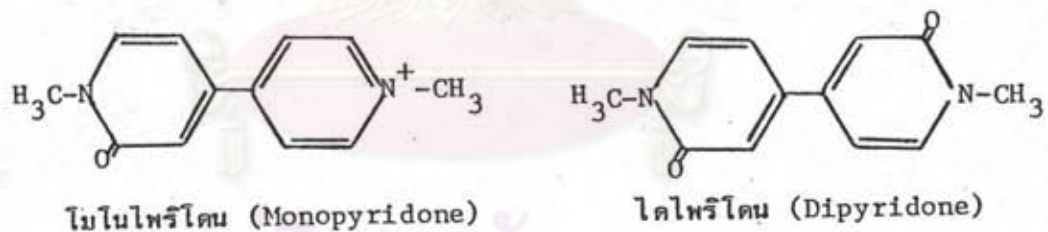
สามารถแบ่งได้เป็น

2.4.2.1 ปฏิกิริยาการสลายตัวทางเคมี (Chemical degradation)

พาราควอตนั้น เสถียรทั้งในสภาวะที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง แต่จะไม่เสถียรในสภาวะที่เป็นด่างมาก ๆ ($\text{pH} > 12$) เพราะจะทำให้เกิดการสลายตัวได้โดย เกิดปฏิกิริยา Demethylation ทำให้พาราควอตถูกเปลี่ยนเป็น 1-เมทิล-4-(4'-ไพริดีล) ไพริดีเนียมและ เมทานอล ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (19)



ในสภาพที่สารละลายเป็นด่าง อากาศก็สามารถที่จะออกซิไดซ์พาราควอตให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลาย ๆ อย่าง เช่น ทำให้เกิดเป็น



4-คาร์บอกซี-1-เมทิล ไพริโดเนียม ไอออน

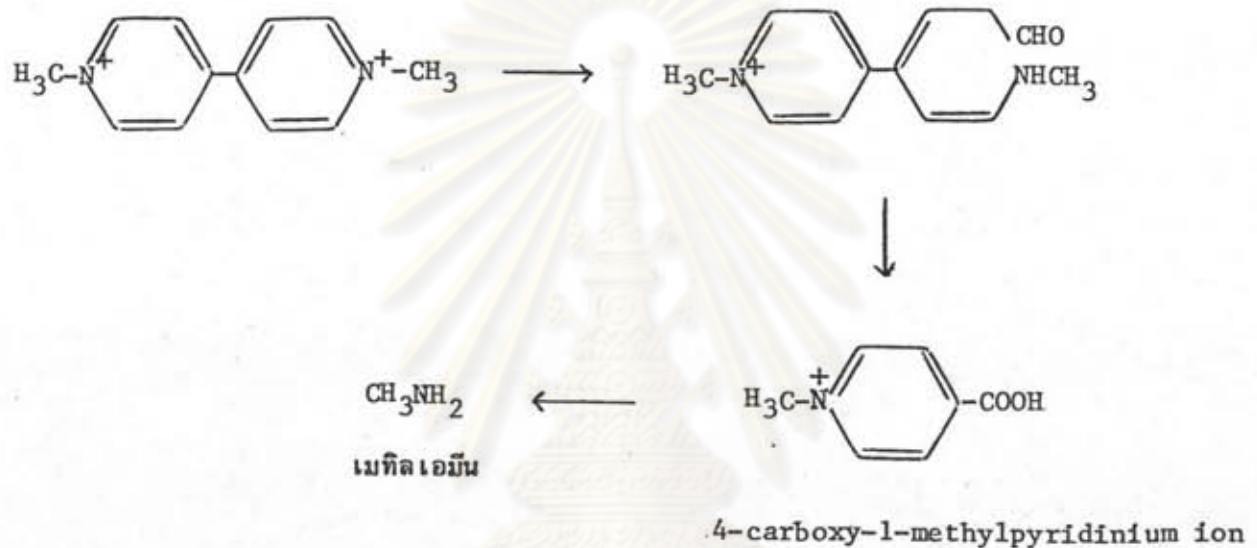
(4-Carboxy-1-methyl pyridinium ion)

นอกจากนี้แล้ว ความชื้น และอุณหภูมิก็สามารถทำให้พาราควอตเกิดการสลายตัวได้

เช่นกัน

2.4.2.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสง (Photochemical degradation)

แสงสามารถทำให้พาราควอตสลายตัวได้ ดัง เช่นจากการทดลองของ Slade (24) ได้ใช้แสง UV จาก Mercury vapour lamp ส่องผ่าน (irradiate) สารละลายเจือจางของพาราควอตไดคลอไรด์ และตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีอยู่หลายชนิด แต่มีเพียง 2 ชนิดที่มีปริมาณมากที่สุดคือ 4-คาร์บอกซี-1-เมทิลไพริดีเนียม ไอออน (4-Carboxy-1-methylpyridinium ion) และ เมทิลเอมีน (methylamine) ดังปฏิกิริยา (25)



แต่ถ้า Irradiate ด้วยแสงแคด พาราควอตจะสลายตัวเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก สารละลายพาราควอตสามารถดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 257 nm ได้มากที่สุด ซึ่งเป็นความยาวคลื่นใกล้เคียงกับแสงที่ได้จาก Mercury vapour lamp (254 nm) แต่แสงแคดเป็นแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นกว้างและมีความยาวคลื่นสั้นค่าสุดที่ประมาณ 290 nm ดังนั้นสารละลายพาราควอตจึงสลายตัวได้เพียงเล็กน้อย

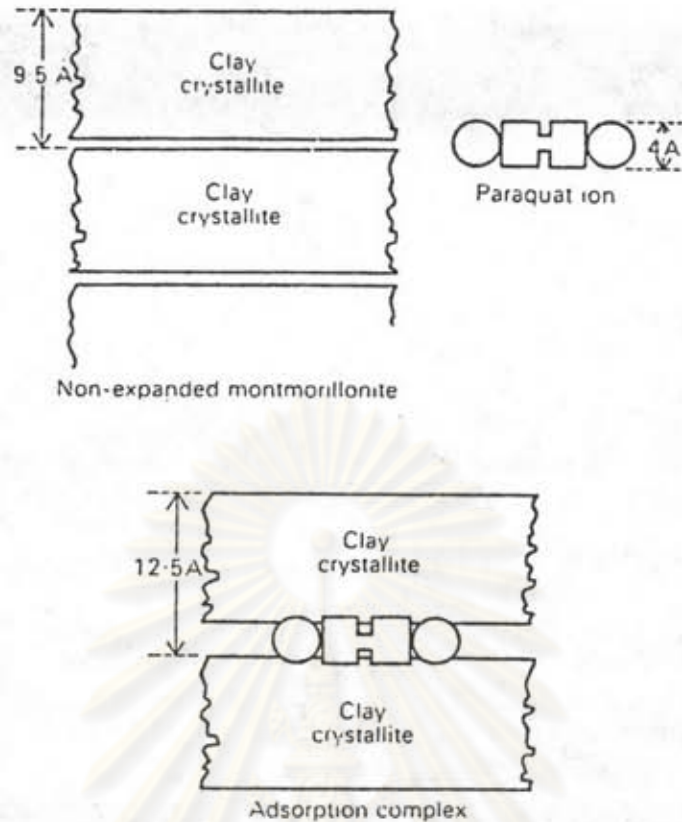
ในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสงของพาราควอต จะเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในกรณีที่ใช้พาราควอตเป็นสารกำจัดวัชพืชในน้ำ ภายหลังจากการฉีดพ่นสารละลายพาราควอตบนผิวน้ำ หรือฉีดเป็นจุด ๆ ใต้วงกันประมาณ 2-3 เมตร วัชพืชในน้ำต่าง ๆ จะดูดซับพาราควอตอย่างรวดเร็วจนกระทั่งความเข้มข้นของพาราควอตในเนื้อเยื่อของวัชพืชมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของพาราควอตในน้ำโดยรอบ นอกจากนี้พาราควอตยังถูกยึดได้ด้วยอนุภาคของดินที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ จึงทำให้ปริมาณของพาราควอตในน้ำลดลงและอัตราการลดลงของพาราควอตในน้ำจะขึ้น

อยู่กับ อัตราเร็วของการไหลของกระแสน้ำ ความหนาแน่นของวัชพืชน้ำ ปริมาณของโคลนและอนุภาคของดินที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ความลึกของแหล่งน้ำนั้น และความเข้มของแสงแดดบนผิวน้ำ ล้วนทำให้ปริมาณของพาราควอทที่เหลืออยู่ในน้ำมีปริมาณน้อยมาก จะเห็นได้จากการทดลองของ Austin (26) ทำการวิเคราะห์ปริมาณของพาราควอทในแหล่งน้ำที่ได้รับพาราควอทปริมาณ 0.50-1.00 ppm พบว่าใน 7 วัน ปริมาณพาราควอทจะลดลงต่ำกว่า 0.10 ppm และจะตรวจไม่พบเมื่อผ่านไป 17 วัน ได้มีผู้ทำการทดลองศึกษาปฏิกิริยาการสลายตัวของพาราควอทในน้ำด้วยแสง พบว่า พาราควอทจะสามารถสลายตัวได้มากกว่า 75% ของปริมาณทั้งหมดภายหลังจากให้แสงผ่านเป็นเวลา 96 ชั่วโมง และปฏิกิริยาการสลายตัวของพาราควอทในน้ำจะเกิดได้อย่างรวดเร็วถ้าแสงที่ผ่านเป็นแสงอุลตราไวโอเล็ต

สำหรับปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสงของพาราควอทเมื่ออยู่ในดิน จะเกิดขึ้นได้น้อยมากหรือไม่เกิดขึ้นเลย ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการยึดพาราควอทของอนุภาคดิน เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและเหนียวแน่นด้วยแรงระหว่างประจุ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของอนุภาคดินด้วย โดยสามารถแบ่งแรงการยึดระหว่างอนุภาคของดินกับพาราควอทเป็น 2 ลักษณะคือ

- การยึดแบบเหนียวแน่น (Tightly bound)
- และ - การยึดแบบไม่เหนียวแน่น (loosely bound)

ซึ่งจะ เป็นแรงยึดชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคของดิน (27) โดยพบว่าถ้าดินนั้นเป็นดินที่มีปริมาณของ clay อยู่มาก เช่น พวก montmorillonite, kaolinite ฯลฯ เป็นต้น หรือมีปริมาณของสารอินทรีย์อยู่ในดิน ก็จะเป็นแรงยึดแบบเหนียวแน่น ซึ่งพบว่าความสามารถในการยึดพาราควอทของดินอยู่ในช่วงประมาณ 50-5,000 ไมโครกรัมของพาราควอท/ดิน 1 กรัม และค่านี้อาจเพิ่มขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของ clay ในดินนั้น ได้มีผู้ศึกษาถึงความสามารถของ clay ชนิดต่าง ๆ ในการยึดสารละลายพาราควอท และจัดลำดับไว้ดังนี้ montmorillonite > vermiculite > illite > kaolinite และจากการศึกษาด้วย X-ray diffraction พบว่า ไอออนของพาราควอทซึ่งมีโครงสร้างแบนราบจะถูกยึดอยู่ระหว่างชั้นของ clay crystallite ในโมเลกุลของ clay เกิดเป็น Absorption complex ที่มีโครงสร้างเป็น "biscuit-like crystallites" (28) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2

จากปฏิกิริยาที่พาราควอตถูกยึดโดยอนุภาคของดินดังกล่าวข้างต้นนั้น จึงช่วยให้สามารถอธิบายถึงการสูญเสียความสามารถในการกำจัดวัชพืช (herbicidal inactivation) ของสารละลายพาราควอตเมื่อตกถึงดินได้ เมื่อเป็นเช่นนี้แล้ว พาราควอตจึงมีโอกาที่จะสลายตัวด้วยแสงได้น้อยมาก อีกทั้งแสงแดดเป็นแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นกว้างมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสงที่สารละลายพาราควอตสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด (257 nm) อีกด้วย

2.4.2.3 ปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยจุลินทรีย์ (Microbiological decomposition)

พวกจุลินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งอาศัยอยู่ในดิน ในน้ำ หรือในสัตว์ต่าง ๆ สามารถที่จะทำปฏิกิริยากับพาราควอตได้ โดยจุลินทรีย์บางชนิดก็จะทำการสลายพาราควอตให้มีพิษน้อยลง บางชนิดก็สามารถใช้พาราควอตเป็นแหล่งของคาร์บอนและไนโตรเจน บางชนิดก็สามารถเปลี่ยนให้พาราควอตเป็นแรติเคิลอิสระ ซึ่งมีสี หรือตัวของจุลินทรีย์เองจะดูดซับสีของแรติเคิลอิสระนั้น เป็นต้น สำหรับตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับพาราควอตได้ เช่น *Neocosmopora vainfecta* สามารถที่จะรีดิวซ์พาราควอตให้เปลี่ยนเป็นแรติเคิลประจุบวกซึ่งมีสีน้ำเงิน และไม่

สามารถสลายพาราควอตต่อไปอีกได้, Aerobacter aerogenes, Agrobacterium tumefaciens, Pseudomonas fluorescens และ Bacillus cereus (29) เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถใช้สารละลายพาราควอตเป็นแหล่งของไนโตรเจนและคาร์บอน, Corynebacterium fascians, Clostridium pasteurianum และพวก anaerobic species สามารถที่จะสลายพาราควอตลงประมาณ 20-40% ของสารละลายพาราควอต 10 ppm นอกจากนี้ยังมียีสต์ชนิดหนึ่งชื่อ Lipomycea starkeyi (30) สามารถที่จะสลายพาราควอตประมาณ 20 ppm ได้ อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 2-3 วัน และใช้พาราควอตเป็นแหล่งของไนโตรเจนอีกด้วย

เมื่อพาราควอตเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในน้ำหรือในดินก็ตาม ดังที่ได้อธิบายแล้วว่าพาราควอตจะถูกยึดด้วยอนุภาคของดินอย่างรวดเร็วและเหนียวแน่นถ้าดินนั้นมี clay ปนอยู่มาก ดังนั้นโอกาสที่พาราควอตจะถูกสลายด้วย Microbiological decomposition มากน้อยเท่าใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของ clay ในอนุภาคดินนั้นเช่นกัน ประกอบกับ Microbiological decomposition เป็นขบวนการที่ใช้เวลานานกว่าขบวนการสลายตัวด้วยวิธีอื่นประมาณ 5-7% ค่อมิ เฉพาะกรณีที่มีการใช้พาราควอตด้วยอัตราที่กำหนด (8.9 kg/ha) แต่ถ้าใช้พาราควอตในปริมาณที่มากกว่าที่กำหนด โอกาสนี้ก็เปลี่ยนไป

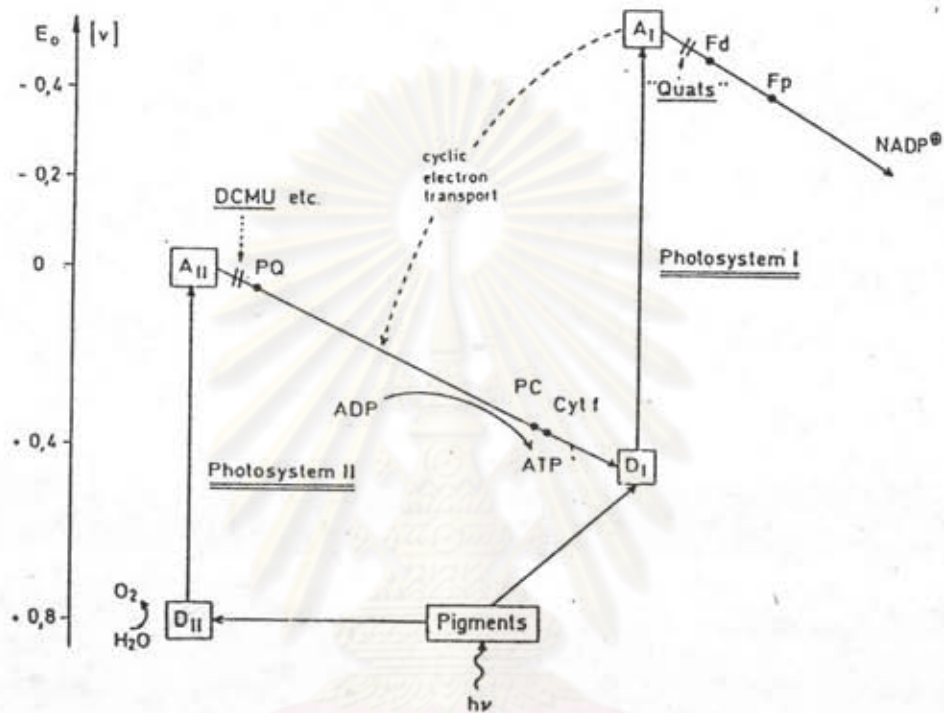
2.4.3 การสลายตัวของพาราควอตในพืช (Degradation in Plant)

พาราควอตจะไม่ถูกสลายตัวด้วยพืช เลยถ้าใช้ตามปริมาณที่กำหนดไว้ ทั้งนี้เพราะพาราควอตเองจะมีฤทธิ์ในการทำลาย เนื้อเยื่อของต้นพืชอย่างรวดเร็วทำให้ต้นพืชนั้นตายในที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาการทำลายจะได้อธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป โดยแสงแดดเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการสลายตัวของพาราควอตเอง และต่อการกำจัดวัชพืชของพาราควอต พาราควอตที่เกาะอยู่ตามผิวของใบ, ลำต้นของพืช สามารถที่จะถูกสลายตัวด้วยแสงได้ แต่ก็มักจะเกิดภายหลังที่ส่วนของพืช เหล่านั้นถูกทำลายแล้ว

2.5 กลไกของปฏิกิริยาการทำลายวัชพืชของพาราควอต (Mechanism of Action)

ปฏิกิริยาการทำลายวัชพืชของพาราควอตนั้น Mees (31) ได้ทำการทดลองพ่นพาราควอตกับต้นพืช แล้วนำไปไว้ในที่มีแสง และไม่มีแสง ในเวลาเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน ผลปรากฏว่าต้นพืชที่อยู่ในที่มีแสงจะเหี่ยวเฉาและตายอย่างรวดเร็ว แต่ต้นพืชที่อยู่ในที่มีมืดจะตายอย่างช้า ๆ จากการนำเอา เซลล์ของต้นพืชที่ตายลงนั้นมาตรวจสอบพบว่ามี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดขึ้น ซึ่งได้อธิบายไว้ว่า พาราควอตมีผลต่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสงของต้นพืชในกรณีที่มีแสง

โดยส่วนที่มีสีเขียวของพืชหรือคลอโรฟิลล์จะถูกทำลาย เนื่องจากพาราควอตสามารถถูกรีดิวซ์ให้เป็นแรดิคัลอิสระประจุบวกโดยใช้อิเล็กตรอนในขบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (Electron Transport process) ดังนั้นจึงทำให้ขบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ของต้นพืชถูกยับยั้ง (32) ทำให้ปฏิบัติการสร้างพลังงานถูกยับยั้งด้วย ซึ่งสามารถแสดงกลไกของปฏิกริยาดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพของ Redox potential ของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในขบวนการสังเคราะห์แสงของคลอโรพลาสต์

NADP⁺ : Nicotinamide-adenine-dinucleotide phosphate cation

ADP : Adenosine diphosphate

ATP : Adenosine triphosphate

D_{I,II} : ตัวให้อิเล็กตรอนใน Photosystems I และ II

A_{I,II} : ตัวรับอิเล็กตรอนใน Photosystem I และ II

Cyt f : ไซโตโครม เอฟ (hemoprotein, E_o = +0.36 V)

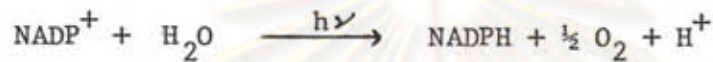
Fd : เฟอร์รีดอกซิน (nonhemo-ferroprotein, E_o = -0.42 V)

Fp : Fd-NADP⁺-ออกซิโดรีดักเตส (flavoprotein; E_o = -0.42 V)

PC : พลาสโตไซยานิน (copper protein E_o = +0.36 V), PQ:

พลาสโตควิโนน

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะเกิดขึ้นภายในคลอโรพลาสต์ (chloroplast) โดยเมื่อได้รับแสงพิกเมนต์ (pigment) ต่าง ๆ ในคลอโรพลาสต์คือ คลอโรฟิลล์ เอ และ คลอโรฟิลล์ บี จะดูดกลืนแสงนั้น แล้วสะสมพลังงานไว้ในสภาวะกระตุ้น (activated pigments) จากนั้นจะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมีโดยผ่านขบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (electron transport processes) ในทั้ง 2 ระบบ (Photosystem I และ II) ขณะเดียวกันก็จะมี การให้ออกซิเจน (O_2) ออกมาด้วย เนื่องจากเกิด Photolysis โมเลกุลของน้ำ พร้อมกับการเปลี่ยน $NADP^+$ (Nicotinamide-adenine-dinucleotide-phosphate cation) เป็น NADPH ดังสมการ



ซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างพลังงานภายในคลอโรพลาสต์ จาก ADP (Adenosine diphosphate) และอนินทรีย์ฟอสเฟต, Pa (inorganic phosphate) ให้เป็น ATP (Adenosine triphosphate) ดังนี้



ขบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้ง 2 ระบบนั้น จำเป็นต้องมีตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน (electron carriers) เช่น พลาสโทควิโนน (plastoquinone), ไซโตโครม (cytochrom), พลาสโทไซยานิน (plastocyanin), เฟอร์รีดอกซิน (ferredoxin) เป็นต้น จึงจะสามารถเกิดขบวนการรีดักชันของ $NADP^+$ ควบคู่กับการสร้าง ATP ให้กับเซลล์พืช พบว่าตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนในระบบ Photosystem I คือ เฟอร์รีดอกซิน เป็นตัวสำคัญในการสร้าง ATP ให้กับเซลล์ เนื่องจากพาราควอทและ เฟอร์รีดอกซินมีความสามารถในการเป็นตัวส่งผ่านหรือรับอิเล็กตรอนได้ใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นได้จากค่า standard reduction potential, E°

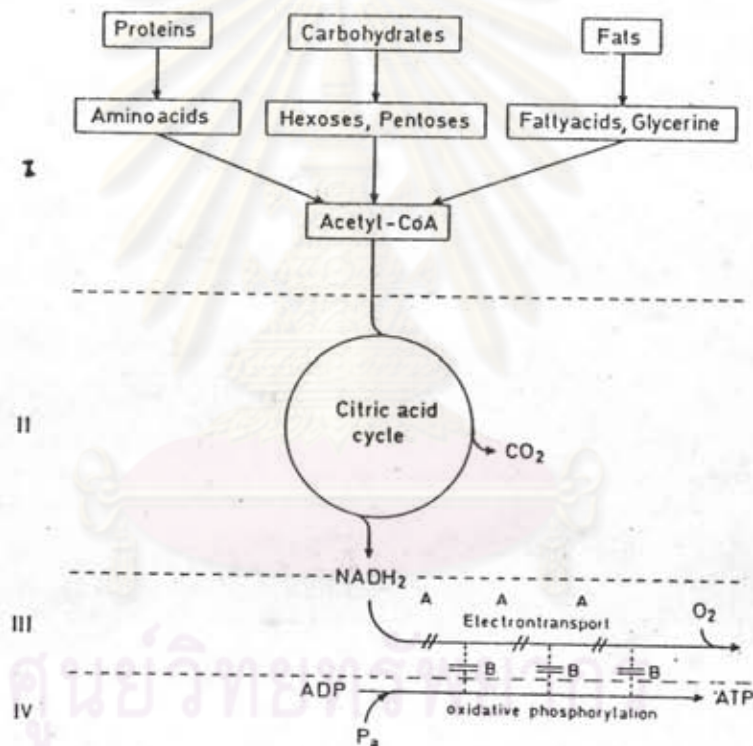
$$\text{พาราควอท} \quad E^{\circ} = -446 \text{ mV}$$

$$\text{เฟอร์รีดอกซิน} \quad E^{\circ} = -430 \text{ mV}$$

ดังนั้นพาราควอทจึงสามารถที่จะไปแทนที่เฟอร์รีดอกซินในขบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในขบวนการสังเคราะห์แสงของต้นพืช ทำให้ขบวนการสร้างพลังงานในเซลล์พืชถูกยับยั้ง และพาราควอทก็ถูกเปลี่ยนเป็นแรดิคัลอิสระประจุบวก เนื่องจากอิเล็กตรอนในขบวนการเคลื่อนย้าย

สมบัติที่สำคัญของอาหารคาวทกก็คือ ความสามารถในการถูกวิดิวิธ และออกซิไดซ์ได้โดยง่าย ดังนั้นปริมาณของอาหารคาวทกไม่ต้องมากนักก็สามารถที่จะทำให้ เกิดอันตรายต่อคณพิชได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่วิชพิชจะตายได้นั้น เป็น เพราะผลคภัพทที่ได้จากปฏิกิริยา วิคคชัน-ออกซิเคชัน ของอาหารคาวทก ไม่ได้เกิดจากอาหารคาวทกเองโดยตรง ประกอบกับการสูญเสียพลังงานและสารอาหารที่ควรได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง ดังนั้น เกษตรกรจึงนิยมใช้พาราควอทเพราะสา เหตุดังกล่าว

ในกรณีที่ไม่ม่แสง พาราควอทก็สามารถมีฤทธิ์ทำลายวิชพิชได้เช่นกัน แต่จะช้ากว่าเมื่อมีแสง ทั้งนี้เพราะพาราควอทจะไปมีผลต่อระบบหายใจ (respiration) ของคณพิช (๓๓) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพขบวนการหายใจภายในเซลล์ของพิช

โดยปกติขบวนการหายใจของพิชจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาต่าง ๆ ต่อไปนี้

I. โปรตีน, คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโน, น้ำตาลเฮกโซส, น้ำตาลเพนโทส, กรดไขมัน และกลีเซอริน ตามลำดับ และในที่สุดจะถูกเปลี่ยนเป็น acetyl-Coenzyme A เพื่อเข้าสู่ Krebs cycle

II. ภายใน Krebs cycle acetyl-CoA จะถูกออกซิไดส์ให้เป็น $NADH_2$ (reduced nicotinamide-adenine-dinucleotide)

III. เป็นปฏิกิริยา Reoxidation และ $NADH_2$ จะให้อิเล็กตรอนกับตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน (electron carriers) ของขบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในไมโทคอนเดรีย (mitochondrial electron-transport) และให้ออกซิเจนออกมา

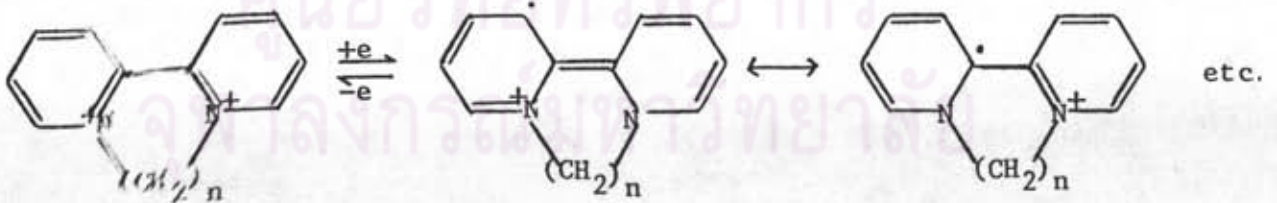
IV. เป็นปฏิกิริยา Oxidative phosphorylation โดยจะสะสมพลังงานที่เกิดจกขบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนให้อยู่ในรูปของ ATP จาก ADP และอนินทรีย์ฟอสเฟต โดย 1 โมเลกุลของ $NADH_2$ จะให้ ATP 3 โมเลกุล

พาราควอตจะมีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยา III และ IV เท่านั้น โดยพาราควอตจะไปขัดขวางการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนในไมโทคอนเดรีย ด้วยการไปแย่งรับอิเล็กตรอนแทนตัวส่งผ่านอิเล็กตรอนเดิม จึงทำให้ขบวนการหายใจถูกยับยั้ง หรือพาราควอตจะไปยับยั้งปฏิกิริยาการสะสมพลังงานในปฏิกิริยา IV ซึ่งถ้าเป็นกรณีหลังนี้ขบวนการหายใจจะไม่ถูกยับยั้ง แต่จะเป็นขบวนการหายใจที่ไม่ให้พลังงานแทน จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้วัชพืชตายได้ในที่สุด

2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางเคมีของพาราควอตกับแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืช
(Relationship of herbicidal activity and structure)

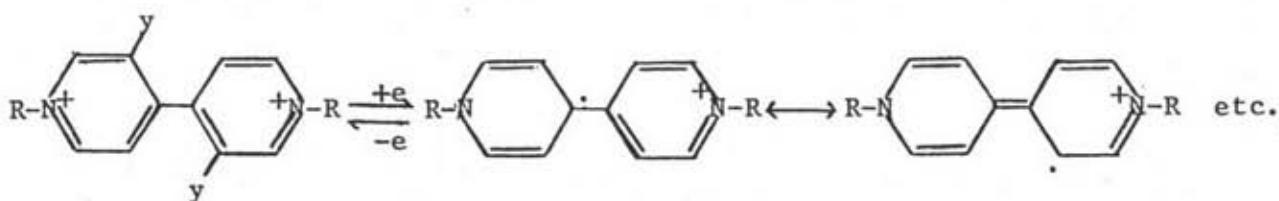
เนื่องจากพาราควอตถูกจัดเป็นสารกำจัดวัชพืชประเภท ไบไพริโดเลียม ซึ่งถูกแบ่งตามโครงสร้างได้เป็นดังนี้ (34)

1. กลุ่มของ 2,2'-ไดไพริดีล (2,2'-dipyridyl series)



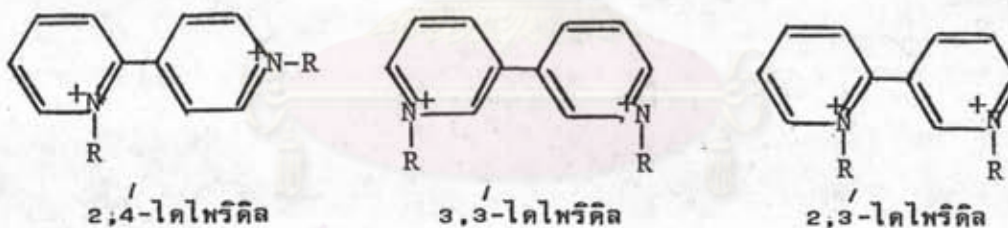
ถ้า n มีค่ามากกว่า 2 จะทำให้สารนั้นมีแอกติวิตีน้อยลง เช่น $n=2$ จะเป็นสารที่มีแอกติวิตีสูงที่สุด ซึ่งนำมาใช้ในการเป็นสารกำจัดวัชพืชชื่อว่า "ไดควอท" (Diquat) แต่ถ้าระหว่าง 2 ring นั้นมี trimethylene ($n=3$) แล้วแอกติวิตีก็จะลดลง และจะลดลงอีกถ้าเป็น tetramethylene ($n=4$)

2. กลุ่มของ 4,4'-ไดไพริดีล (4,4'-Dipyridyl Series)



สำหรับสารกลุ่มนี้ ถ้า $y = H$ แม้ว่า R จะเป็นหมู่แอลคิล (Alkyl group) ใดก็ตาม สารนั้นจะยังคงมีแอกติวิตีในการ เป็นสารกำจัดวัชพืช แต่พบว่าสารนี้จะมีแอกติวิตีมากที่สุดก็ต่อเมื่อ $R = -CH_3$ และ $Y = H$ ก็คือ 1,1'-ไดเมทิล-4,4'-ไบไพริดีล (35) หรือเรียกว่า พาราควอต นั้นเอง สารกลุ่มนี้จะไม่มืแอกติวิตีก็ต่อเมื่อตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งใดของคาร์บอนอะตอมที่อยู่ติดกับ บริเวณที่ pyridine ring ทั้ง 2 เชื่อมต่อกัน มีแรดิเคิลอื่นที่ไม่ใช่หมู่ไฮโดรเจน เช่น 3,3'-ไดเมทิล-1,1'-R-4,4'-dipyridyl ($y = CH_3$)

3. กลุ่มของ 2,4'-ไดไพริดีล, 3,3'-ไดไพริดีล และ 2,3'-ไดไพริดีล (2,4' Dipyridyl, 3,3'-dipyridyl, and 2,3'-dipyridyl series)



กลุ่มนี้มีแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชได้น้อยมาก เนื่องจาก 2,4'-ไดไพริดีล เกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยมาก ส่วน 3,3'-ไดไพริดีล และ 2,3'-ไดไพริดีล ไม่มีแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชได้เลย

จะเห็นว่าสารในกลุ่มของไบไพริดีลเลียนนั้น มีเพียง 2 ชนิดเท่านั้นที่มีแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชได้สูงสุดคือ ไคควอต หรือ 1,1'-เอทิลีน-2,2'-ไดไพริดีล และพาราควอต หรือ 1,1'-ไดเมทิล-4,4'-ไบไพริดีล

2.7 ลักษณะที่สำคัญเฉพาะตัวของสารในกลุ่มไพโรไดเลียมในการมีแอกติวิตีเพื่อกำจัดวัชพืช
(Characteristics of dipyridylum quaternary salt possessing
herbicidal action)

สามารถสรุปได้ดังนี้ (36)

1. โครงสร้างของโมเลกุลจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกันกับวงแหวนไพริดีน (Coplanarity of the pyridine rings)

พาราควอท และไดควอท ซึ่งมีแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็น coplanar ด้วยกันทั้งคู่ (37)

2. สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันแบบรับอิเล็กตรอนตัวเดียว เกิดเป็นแรดิคัลอิสระ (Free radical formation upon reduction)

ความสามารถในการมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็น coplanar ยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายถึงการมีแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืช เช่น กลุ่มของ 2,3'-ไดไพริดีล และ 3,3'-ไดไพริดีล บางตัวมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็น coplanar ได้ แต่ก็ไม่มีแอกติวิตี เนื่องจากไม่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้เป็นแรดิคัลอิสระได้ แต่สำหรับพาราควอทและไดควอทสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันโดยรับอิเล็กตรอนตัวเดียวเกิดเป็นแรดิคัลอิสระประจุบวกได้ โดย Redox potential มีค่าเท่ากับ -446 mV สำหรับพาราควอทและ -349 mV สำหรับไดควอท นอกจากนี้อนุพันธ์ของกลุ่ม 2,4'-ไดไพริดีลบางตัว เช่น อนุพันธ์ 1,1'-ไดเมทิล ($R = CH_3$) ก็สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันให้เป็นแรดิคัลอิสระประจุบวกได้เช่นกัน แต่แอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชไม่เทียบเท่ากับพาราควอทและไดควอท ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากมีค่า Redox potential ค่าเท่ากับ -640 mV นั่นคือ ค่า Redox potential ยิ่งเป็นลบมากเท่าไรแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชยิ่งจะลดลงตามลำดับด้วย

3. ความเสถียรของแรดิคัลอิสระ (Stabiliby of the free radical)

แรดิคัลอิสระประจุบวกของพาราควอทและไดควอทที่เกิดขึ้นนั้น จะมีอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpaired electron) ตัวหนึ่งซึ่งสามารถจะเคลื่อนที่ได้ทั่วทั้งโมเลกุล ไม่อยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งตำแหน่งใด (delocalize) ดังนั้นจึงทำให้แรดิคัลอิสระประจุบวกนี้มีความเสถียร โดยพาราควอทและไดควอทแรดิคัลสามารถให้ resonance structure ได้ถึง 12 และ 18 อย่าง ตามลำดับ ซึ่งก็จะมีผลต่อแอกติวิตีในการกำจัดวัชพืชด้วย

สรุปได้ว่าความสามารถในการกำจัดวัชพืชของสารในกลุ่มนี้ขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการรับอิเล็กตรอนตัวเดียว เพื่อให้เกิดเรดิเคิลอิสระที่เสถียร เป็นสำคัญ เพราะปฏิกิริยาการทำลายวัชพืชจำเป็นต้องมีเรดิเคิลอิสระประจุบวกเกี่ยวข้อง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้อ 2.5

2.8 การตกค้างของพาราควอตในสิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษ (Residues and toxicity)

2.8.1 การตกค้างในดิน (Residues in soils), (38)

พาราควอตสามารถถูกยึดได้ด้วยอนุภาคของดินอย่าง เหนียวแน่นถ้าดินนั้นมีปริมาณของ clay อยู่มาก และโอกาสที่พาราควอตจะถูกสลายด้วยแสงหรือจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในดินก็เป็นไปได้น้อยมาก ดังนั้นภายหลังจากใช้พาราควอตจึงยังคงมีพาราควอตส่วนใหญ่ตกค้างอยู่ในดินบริเวณนั้นด้วย

2.8.2 การตกค้างในพืชผักผลไม้ (Residues in crop), (39)

ต้นพืชสามารถที่จะดูดซึม (absorb) และดูดซับ (adsorb) พาราควอตได้เช่นกัน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากัน เพียงแต่เป็นการตกค้างอยู่เท่านั้น แสง, อุณหภูมิ และความชื้น เป็นสาเหตุที่สำคัญต่อการถูกยึด, การเคลื่อนที่ และการสลายตัวของพาราควอตในต้นพืช ดังนั้นส่วนที่เหลืออยู่หลังจากการสลายตัวด้วยแสงแล้ว พาราควอตยังคงตกค้างอยู่ที่พื้นผิวของพืชผักผลไม้ชนิด

2.8.3 การตกค้างในน้ำ (Residues in water), (40)

พาราควอตเมื่อใช้ เป็นสารกำจัดวัชพืชน้ำ สามารถถูกดูดได้ด้วยวัชพืชน้ำ และอนุภาคของดินที่แขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างรวดเร็ว จนความเข้มข้นของพาราควอตในน้ำโดยรอบมีค่าเท่ากับในเซลล์ของวัชพืช ดังนั้นปริมาณของพาราควอตที่ตกค้างอยู่ในน้ำไม่มากนัก ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของพาราควอตที่ใช้

2.8.4 การตกค้างในนม (Residues in milk)

จากการทดลองหาปริมาณของพาราควอตในน้ำนมวัวของ Black และผู้ร่วมงาน (41) พบว่ามีปริมาณของพาราควอตที่ตกค้างอยู่ในน้ำนมวัวน้อยมาก

2.8.5 การสลายตัวและการดูดซับพาราควอตในสัตว์ (Degradation and absorption of paraquat by animals)

Daniel และ Gage (42) และ Black (43) ได้ทำการทดลองโดยให้หนูและแกะกินพาราควอตเข้าไป แล้วทำการวิเคราะห์หาปริมาณ พบว่าปริมาณ 10% ของพาราควอตถูกดูดซับ

ได้ภายในลำไส้และกระเพาะ ส่วนที่เหลือจะถูกขับถ่ายออกมา แต่ในเวลาเพียง 2 วัน ส่วนที่ถูกดูดซับไว้ในลำไส้และกระเพาะนั้นก็จะถูกขับออกมาทางปัสสาวะจนหมด สำหรับสัตว์น้ำต่าง ๆ เช่น ปลา ก็สามารถดูดซับพาราควอตได้เช่นกัน จากการทดลองเลี้ยงปลาในอ่างน้ำที่มีพาราควอตอยู่ 1.00 ppm เป็นเวลา 7 วัน พบว่าที่ลำไส้, ผิวหนัง, ตับ และเหงือก จะมีพาราควอตอยู่ แต่ที่ไตและกล้ามเนื้ออื่น ๆ ไม่สามารถตรวจพบได้ และถ้านำปลานั้นมาเลี้ยงในน้ำสะอาดที่ไม่มีพาราควอต ๆ ที่ดูดซับอยู่ที่ตัวปลานั้นก็จะหลุดออกมาละลายในน้ำจนหมด แต่ในสภาพการใช้งานที่แท้จริงของพาราควอตในการกำจัดวัชพืชน้ำนั้นใช้ความเข้มข้นเพียง 0.50-1.00 ppm เท่านั้น โอกาสที่จะพบพาราควอตสู่ตัวปลา หรือสัตว์น้ำอื่น ๆ น้อยมาก เนื่องจากความสามารถในการดูดซับพาราควอตด้วยวัชพืชน้ำและอนุภาคของดินที่แขวนลอยอยู่มาก และเป็นไปอย่างรวดเร็ว

2.8.6 ความเป็นพิษของพาราควอตต่อคนและสัตว์ Toxicity of paraquat to man and animals)

ในกรณีของสัตว์ พาราควอตจะไปทำลายระบบหายใจและระบบประสาทถ้าได้รับพาราควอตนี้เข้าไป และมีค่า $LD_{50} = 40-75$ มิลลิกรัม/กิโลกรัม ถ้าสัตว์นั้นเป็นพวกแกะ, หนู, แมว และวัวควายต่าง ๆ (44) ในกรณีของมนุษย์ถ้าได้รับพาราควอตเข้าไปโดยการหายใจ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะมีค่า $LD_{50} = 6.4$ มิลลิกรัม/กิโลกรัม และถ้าบริโภคเข้าไปมากกว่า 400 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จะทำให้ตายได้ อาการของพิษพาราควอตโดยทั่วไปจะมีการอาเจียร เพราะพาราควอตไปทำให้เกิดการระคายเคืองต่อกระเพาะอาหาร และลำไส้ ทำให้อุจจาระร่วง จะต้องปฐมพยาบาลโดยการล้างท้องโดยเร็วที่สุด หรือให้ผู้ป่วยดื่มสารละลาย 15% ของฟูลเลอร์เอิร์ท (Fuller's earth) และให้กินยาถ่ายร่วมด้วย แล้วใช้ 20% ของแมนนิทอล (Mannitol) ในน้ำ 1 ลิตร เพื่อล้างท้อง (45) สำหรับอวัยวะส่วนที่จะถูกทำลายเมื่อได้รับพิษของพาราควอตก็คือ ตา, อวัยวะระบบหายใจ, หัวใจ, ตับ, ไต และอวัยวะของระบบทางเดินอาหาร ฯลฯ เป็นต้น

2.9 การวิเคราะห์หาปริมาณของพาราควอตที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม (Determination of paraquat residues)

Calderbank และผู้ร่วมงาน (46) เป็นนักวิทยาศาสตร์กลุ่มแรกที่ได้อธิบายถึงขั้นตอนการสกัด, การแยก และการหาปริมาณของโคควอตจากดินพืช ต่อมา Calderbank และ Yuen (6) ได้นำวิธีที่ได้นั้นมาประยุกต์ใช้กับการหาพาราควอตในผลไม้และผัก และจากวิธีข้างต้นก็ได้มีการนำมาใช้ในการหาพาราควอตที่ตกค้างในผลไม้, ผัก, นม, เนื้อเยื่อของพืช และน้ำ (47) เป็นต้น

หลักการในการหาปริมาณของพาราควอทในตัวอย่างชนิดต่าง ๆ นั้น อาศัยสมบัติของ พาราควอทที่มีประจุบวก และสามารถถูกดูดได้ด้วยพีช และดินซึ่งมีประจุตรงกันข้าม ดังนั้นในการ สกัดจึงจำเป็นต้องใช้กรดซัลฟูริก เข้มข้นค่าหนึ่งในการสกัดตัวอย่างไม่ว่าจะเป็นส่วนต่าง ๆ ของ พีชหรือดินก็ตาม แล้วจึงนำสารละลายกรดที่ได้มาทำให้เจือจางก่อนที่จะนำไปแยกด้วย Cation exchange chromatography เพื่อให้เรซินประจุบวกที่จับพาราควอทไว้ แล้วสุดท้ายจึงชะล้าง พาราควอทออกมาจากเรซินนั้นด้วย แคลอไอออน เช่น H^+ , Na^+ หรือ NH_4^+ จากนั้นจึง นำเอาส่วนที่ชะล้างได้ไปรีตีวซ์ด้วยไซเตียมไดไฮโอไอน์ให้เกิดเป็นแบริเคลอสิสระ แล้วจึงนำไปหา ปริมาณโดยสเปกโตรโฟโตเมตรี สำหรับแบริเคลอสิสระของพาราควอทนั้นมีสีน้ำเงินและดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 392-401 nm แต่ถ้าเป็นการวิเคราะห์ในน้ำไม่จำเป็นต้องมีการสกัดด้วยกรด ซัลฟูริก เข้มข้น ให้นำไปแยกและหาปริมาณโดย Cation exchange chromatography และ สเปกโตรโฟโตเมตรีได้เลยตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย