

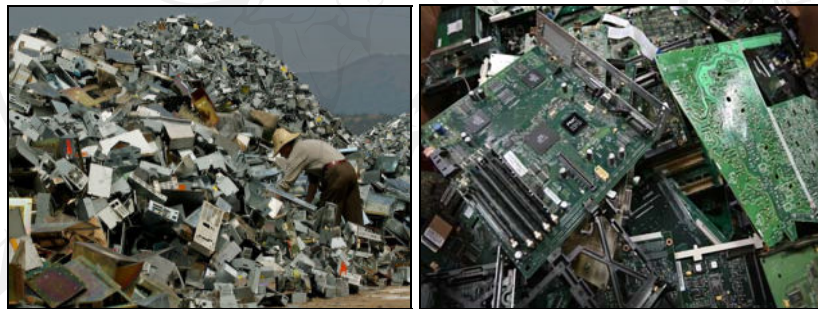
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

บทนี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 การกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์

ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Waste, E-Waste) หมายถึง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่หมดอายุการใช้งานตามกาลเวลาหรือมีสภาพที่ชำรุดเสียหายจากการใช้งานและไม่สามารถใช้งานต่อไปได้



รูป 2.1 ขยะอิเล็กทรอนิกส์

กฎหมายจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศไทยอยู่ในขั้นตอนการร่างกฎระเบียบแก้ไขกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับขยะมีพิษ ซึ่งจากข้อมูลของกระทรวงอุตสาหกรรมพบว่า การกำจัดขยะอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยใช้วิธีการฝังกลบและการเผาทำลาย แนวทางการจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำได้กันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศมีแนวทางหลักๆ ดังนี้

2.1.1 การใช้ซ้ำ (Reuses)

การใช้ซ้ำ สำหรับขยะอิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง การปรับปรุงซ่อมแซมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ชำรุดเสียหายเพื่อการขายต่อเป็นสินค้าใช้แล้วหรือเพื่อบริจาคจากประเทศที่พัฒนาแล้วสู่ประเทศกำลังพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

2.1.2 การรีไซเคิล (Recycle) ขยะอิเล็กทรอนิกส์

การรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ คือ การแยกส่วนที่ยังเป็นประโยชน์ เช่น โลหะมีค่า (จำพวกเงิน ทองคำขาว ทองแดง) ออกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ แล้วนำไปใช้ประกอบในสินค้าใหม่หรือทำประโยชน์ด้านอื่นต่อไป

2.1.3 การฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์

การฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ทำได้โดยการนำขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านกระบวนการแยกชิ้นส่วนที่มีประโยชน์ออกเพื่อการใช้ซ้ำฝังลงในบ่อซีเมนต์ที่มีความหนา 30 เซนติเมตรขึ้นไปและปิดปากบ่อด้วยการเทซีเมนต์ทับแล้วปลูกต้นไม้คลุมหน้าดินเพื่อป้องกันการกัดเซาะของน้ำซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของสารพิษลงในดินและแหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป วิธีการฝังกลบขยะพิษดังกล่าวนี้ใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูงมากเนื่องจากต้องจัดหาสถานที่ฝังกลบที่เหมาะสมและก่อให้เกิดปัญหาพื้นที่ไร้ประโยชน์ การฝังกลบจึงเป็นวิธีจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่นิยมใช้

2.1.4 การเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์

การเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์เป็นกระบวนการที่ใช้กับชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ เช่น วงจรคอมพิวเตอร์ที่ทำการแยกส่วนที่มีประโยชน์ออกหมดแล้ว เป็นต้น กระบวนการทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์กลุ่มนี้ทำเช่นเดียวกับการเผาทำลายขยะอุตสาหกรรม การเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์จะดำเนินการในห้องเผาปิดที่มีระบบบำบัดก๊าซพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ การเผาจะให้ความร้อนกับขยะที่อยู่ในห้องเผาอย่างต่อเนื่องโดยการใช้แหล่งความร้อนแบบต่างๆ เช่น หัวเผาที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน จนขยะเปลี่ยนสภาพเป็นเถ้า (ash) จนหมด ซึ่งขยะที่มีสภาพเป็นเถ้าจากการเผาทำลายจะมีสารพิษตกค้างน้อยกว่าขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ได้ผ่านการเผาทำลาย เนื่องจากโลหะหนักที่เป็นส่วนประกอบที่เป็นพิษส่วนใหญ่ได้ระเหยไปในกระบวนการเผาทำลายจึงสามารถนำเถ้าที่เหลือไปฝังกลบต่อไป



รูป 2.2 ถ้ำขะอะอิลีกทรอนิกส์ที่ผ่านกระบวนการเผาทำลาย

2.2 พลาสมา

2.2.1 ที่มาของพลาสมา

พลาสมาเป็นการกล่าวถึงครั้งแรกโดย เซอร์ วิลเลียม ครูกส์ (Sir William Crookes) เมื่อ ค.ศ. 1879 และคิดคำว่าพลาสมา โดย เออร์วิง แลงมัวร์ (Irving Langmuir) เมื่อ ค.ศ. 1928 พลาสมา ในทางเคมีและฟิสิกส์ คือ สถานะที่ 4 ของสสาร จากสถานะของสสารทั้งหมด 6 สถานะ คือ

สถานะ 0 : Bose-Einstein condensate

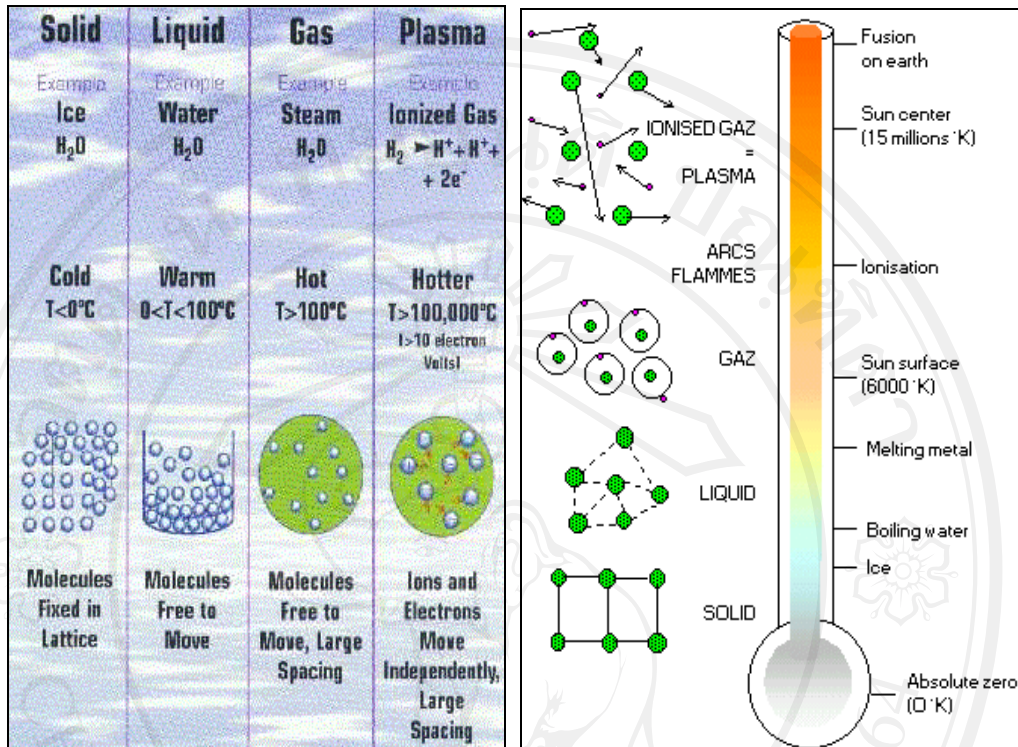
สถานะ 1 : ของแข็ง (Solid)

สถานะ 2 : ของเหลว (Liquid)

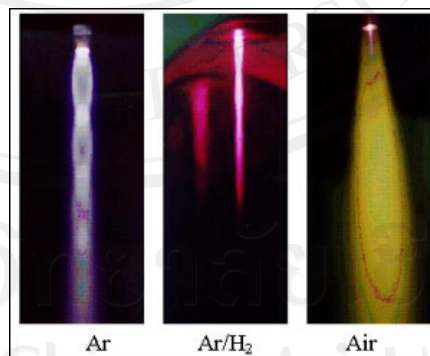
สถานะ 3 : ก๊าซ (Gas)

สถานะ 4 : พลาสมา (Plasma)

สถานะ 5 : ฟิลาเมนต์ (Filament)



รูป 2.3 การจับตัวของโมเลกุลในสถานะต่างๆของสสาร

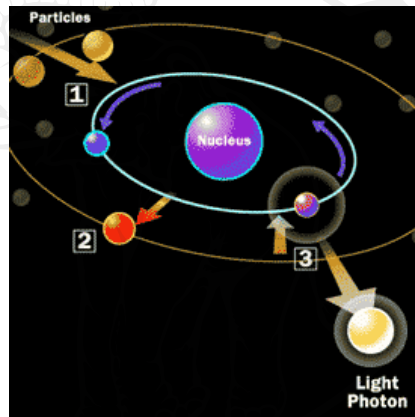


รูป 2.4 พลาสมาที่เกิดจากก๊าซชนิดต่างๆ

2.2.2 การเกิดพลาสมา

พลาสมา เกิดจากการแตกตัวของประจุไฟฟ้าที่มีอยู่ในสสารเนื่องจากได้รับพลังงานความร้อนหรือได้รับการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานที่ทำให้อะตอมของ

สสารคงรูปอยู่ได้ทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีอยู่ในสสารนั้นเกิดการแตกตัวและปลดปล่อยพลังงานออกมา ในรูปของพลังงานแสงและพลังงานความร้อนซึ่งก๊าซในสถานะพลาสมา จะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและมีความร้อนสูงมาก ถ้าอุณหภูมิของก๊าซสูงประมาณ 3,500 องศาเซลเซียส โมเลกุลจะแตกตัวเป็นอะตอมเดี่ยว ที่อุณหภูมิก๊าซ 40,000 องศาเซลเซียส อะตอมจะสูญเสียอิเล็กตรอนเหลือแต่นิวเคลียสที่ไร้อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนอิสระที่ไร้นิวเคลียส และหากอุณหภูมิของก๊าซสูงถึง 1,000,000 องศาเซลเซียส นิวเคลียสจะแตกออกเป็นอนุภาคเดี่ยวที่มีประจุและมีพลังงานความร้อนสูงจึงเรียกว่า High Energy Particle เช่น สสารสถานะพลาสมาในดาวฤกษ์



รูป 2.5 การแตกตัวของอิเล็กตรอนจากอะตอมทำให้เกิดพลาสมา

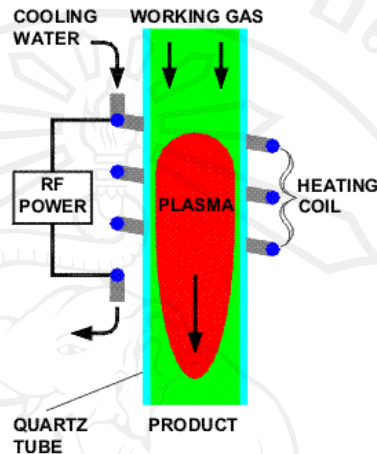
2.2.3 การสร้างพลาสมา

การทำให้สสารเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมานั้นมีหลายวิธี วิธีสร้างพลาสมาที่เป็นที่นิยมมีดังนี้

2.2.3.1 การให้พลังงานความร้อนปริมาณสูงกับสสารสถานะก๊าซ

การให้พลังงานความร้อนแก่สสารสถานะก๊าซในปริมาณที่สูงจะทำให้อุณหภูมิของก๊าซจะสูงขึ้น ซึ่งถ้าพลังงานความร้อนมีมากพอประจุไฟฟ้าจะแยกออกจากอะตอมของสสารได้ประจุลบ (อิเล็กตรอน) และประจุบวก (โปรตอน) กระจายตัวออกที่มีความเข้มข้นเกือบเท่ากัน ทำให้สสารสถานะก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา พลาสมาที่มาจากวิธีการให้พลังงานความร้อนนี้จะทำได้

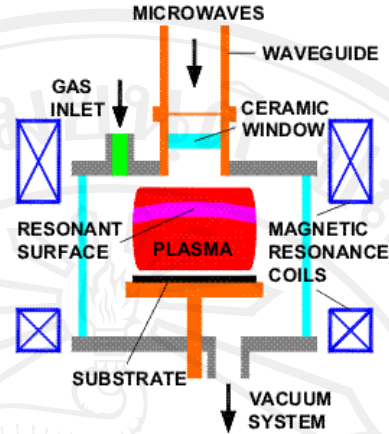
ยากเนื่องจากแหล่งความร้อนที่ให้อุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้อะตอมของก๊าซแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้า มีน้อย



รูป 2.6 การสร้างพลาสมาจากการให้พลังงานความร้อนปริมาณสูง

2.2.3.2 การกระตุ้นการแตกตัวของโมเลกุลสสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

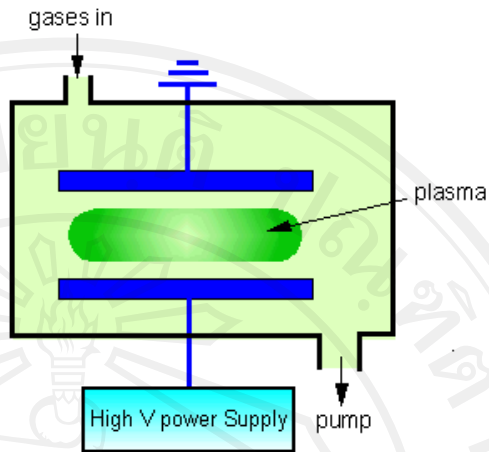
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงเมื่อกระทบหรือชนกับโมเลกุลของสสารจะทำให้โมเลกุลของสสารเกิดการสั่น หากการสั่นนั้นมีความรุนแรงมากพอจะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุล ออกเป็นประจุไฟฟ้าทำให้สสารนั้นเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่นิยมนำมาสร้างพลาสมา คือ คลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง สามารถสร้างและควบคุมได้ง่าย การสร้างพลาสมาด้วยคลื่นไมโครเวฟนิยมทำกับสสารสถานะก๊าซ เนื่องจากโมเลกุลของสสารสถานะก๊าซแตกตัวได้ง่ายหากเทียบกับสสารสถานะอื่นๆ



รูป 2.7 การสร้างพลาสมาจากคลื่นไมโครเวฟ

2.2.3.3 การกระตุ้นการแตกตัวของโมเลกุลสารด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง

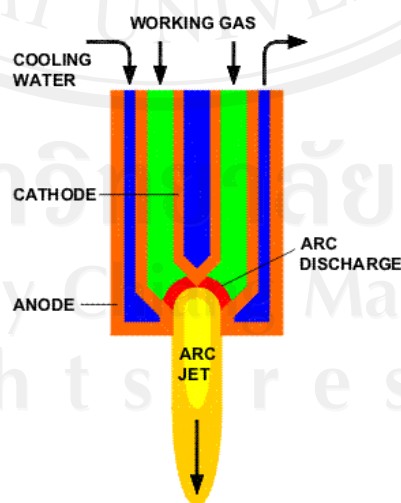
การให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนด (+) และ ขั้วแคโทด (-) สูงมากจะเกิดสนามไฟฟ้าแรงสูงทำให้ประจุลบ (Electron) จากขั้วแคโทด (-) แตกตัวและกระโดดสู่ขั้วแอโนด (+) ได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางทางไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ในธรรมชาติ เช่น การเกิดฟ้าผ่า เป็นต้น การที่ประจุลบแตกตัวออกจากโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดทำให้เกิดพลาสมาที่เรียกว่า พลาสมาโลหะ (Iron Plasma) ซึ่งเป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำเนื่องจากโลหะเป็นของแข็งที่มีการจับตัวกันของอะตอมเป็นพันธะโลหะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมสูงจึงทำให้ประจุลบแตกตัวออกจากอะตอมได้ยากและมีปริมาณการแตกตัวน้อย แต่ถ้ามีการปล่อยก๊าซผ่านสนามไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าว โมเลกุลของก๊าซจะถูกชนด้วยประจุลบที่แตกตัวออกจากโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดจนโมเลกุลของก๊าซแตกตัวออกเป็นพลาสมาของก๊าซชนิดนั้น ทำให้ได้ความร้อนจากการแตกตัวสูงขึ้นมากเนื่องจากโมเลกุลของก๊าซแตกตัวได้ง่ายและหากมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงมากพอโมเลกุลของก๊าซก็จะแตกตัวเกือบทั้งหมด ในกรณีของก๊าซที่นำมาปล่อยผ่านสนามไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าวเป็นก๊าซเชื้อเพลิงด้วยแล้ว หากโมเลกุลของก๊าซเชื้อเพลิงแตกตัวเป็นประจุไม่หมดโมเลกุลของก๊าซที่ไม่แตกตัวเป็นพลาสมาก็จะเกิดการสันดาปขึ้นด้วยความร้อนที่ได้จากการแตกตัวของโมเลกุลอื่นทำให้ได้อุณหภูมิไอร้อนที่เพิ่มขึ้น



รูป 2.8 การสร้างพลาสมาจากสนามไฟฟ้าแรงสูง

2.2.3.4 การกระตุ้นการแตกตัวของโมเลกุลสารด้วยการอาร์ค

การสร้างพลาสมาด้วยวิธีนี้เป็นการกระตุ้นการแตกตัวของ Carrier Gas ด้วยการทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วแคโทดเนื่องจากการอาร์คชนกับอนุภาคของ Carrier Gas โดยตรงทำให้เกิดการแตกตัวของอนุภาคดังกล่าวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระของก๊าซชนิดนั้นๆ หากการชนมีพลังงานมากพอจะทำให้ก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา เรียกว่า พลาสมาอาร์ค



รูป 2.9 การสร้างพลาสมาจากการอาร์ค

2.3 ทฤษฎีไฟฟ้า

2.3.1 การอาร์คทางไฟฟ้า

อาร์คไฟฟ้า คือ การปล่อยประจุที่มีความหนาแน่นของกระแสที่ออกจากอิเล็กโทรดสูง ปริมาณกระแสส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนที่มาจากแคโทดรวมกับไอออนบวกส่วนหนึ่งที่ได้จากการแตกตัวของก๊าซ ในกรณีที่ไอออนบวกที่เกิดจากก๊าซแตกตัวและอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกจากแคโทดมีปริมาณเท่าๆกัน จะเรียกการอาร์คลักษณะนี้ว่า พลาสมาอาร์ค ลักษณะของการอาร์คแบ่งได้ 3 ส่วนดังนี้

ส่วนแรก คือ การอาร์คที่แคโทด เกิดจากการที่ผิวโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าในอากาศ จุดบนผิวแคโทดที่ทำให้เกิดการอาร์ค เรียกว่า Cathodic Spot กระแสอาร์คบริเวณ Cathodic Spot เกิดจากการก่อตัวของอิเล็กตรอนและไอออนบวกโดยอิเล็กตรอนดังกล่าวจะหลุดออกจากแคโทด การเสียดังกล่าวในการอาร์คในส่วนนี้ทำให้ผิวแคโทดเกิดการสึกหรอ

ส่วนที่สอง คือ การอาร์คบริเวณช่องว่างระหว่างแคโทดและแอโนด การอาร์คส่วนนี้เป็นพลาสมาอาร์ค ที่เรียกว่า Positive Column ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำและสม่ำเสมอ ภายในคอลัมน์เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนจากการชนกันของอนุภาคก๊าซเป็นจำนวนมาก อุณหภูมิของก๊าซและไอออนบวกจะมีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนที่สาม คือ การอาร์คในส่วนแอโนด เป็นส่วนที่อิเล็กตรอนจากพลาสมารวมตัวกันเพื่อเข้าสู่แอโนดและผลักให้ไอออนบวกหลุดออกไป บริเวณที่แอโนดสัมผัสกับอาร์คเรียกว่า anode spot มีการสึกหรอของผิวแอโนดเช่นเดียวกับการสึกหรอในการอาร์คของแคโทด ความหนาแน่นของกระแสที่ Anode Spot มีค่าใกล้เคียงกับ Positive Column

ความร้อนสูงที่เกิดจากพลาสมาอาร์ค อาจถ่ายเทออกจากกระแสอาร์คหรือถ่ายเทอยู่ภายในก๊าซ การอาร์คนอกจากจะทำให้เกิดพลาสมาอาร์คความร้อนสูงแล้วยังทำให้เกิดการสึกหรอของขั้วอิเล็กโทรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณ Cathodic Spot จะเกิดการเสียหายอย่างมาก ความรุนแรงของการเสียหายขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด ปริมาณกระแส ความดันก๊าซ และการสมดุลพลังงานที่ผิวอิเล็กโทรด

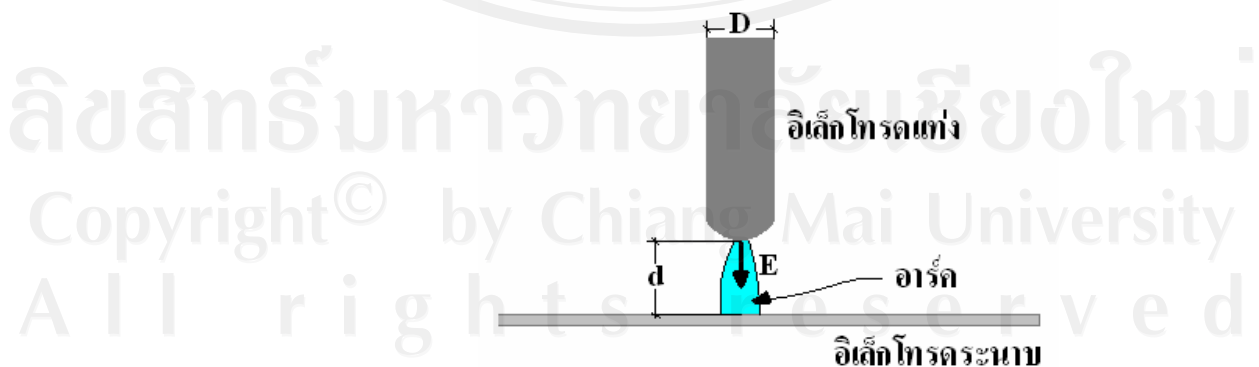
แรงดันไฟฟ้าเบรกควาน (V_b) ที่ทำให้เกิดการอาร์คคำนวณได้จาก

$$V_b = \frac{Bpd}{\ln(pd) + \ln\left[A / \ln\left(1 + \frac{1}{\Gamma}\right)\right]} \quad (2.1)$$

เมื่อ	A, B	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ แสดงในภาคผนวก
	Γ	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแคโทดชนิดต่างๆ
	p	คือ	ความดันก๊าซ (Torr)
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทด (cm)

2.3.2 สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

สนามไฟฟ้า (Electric Field) หมายถึง บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง หรือบริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้านั้น จุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าแตกต่างกัน จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป นอกจากนี้ ณ จุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าค่าต่างกันด้วย ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้า ชนิดเดียวกันกับศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าเจ้าของสนามไฟฟ้านั้น จุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป



รูป 2.10 สนามไฟฟ้าที่เกิดการอาร์ค

สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคำนวณได้ดังนี้

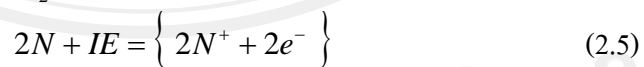
$$E_{\max} = \frac{V_{\max}}{\eta d} \quad (2.2)$$

เมื่อ	E_{\max}	คือ	สนามไฟฟ้าสูงสุด
	V_{\max}	คือ	แรงดันไฟฟ้า
	η	คือ	ประสิทธิภาพของสนามไฟฟ้า มีค่าตั้งแต่ 0-1
	d	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.4 ทฤษฎีการแตกตัวของก๊าซ

การทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นพลาสมาจะต้องให้พลังงานในรูปแบบต่างๆ สถานะก๊าซในปริมาณที่มากพอเพื่อให้ก๊าซนั้นแตกตัวออกเป็นธาตุอะตอมเดี่ยวและให้พลังงานต่อเนื่องอย่างน้อยมากกว่าระดับพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 ของก๊าซนั้นจึงจะทำให้ก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา

ตัวอย่างสมการเคมีของการทำให้ก๊าซ N_2 แตกตัวเป็นพลาสมา



E คือ พลังงานสลายพันธะ (Bound Energy)

IE คือ พลังงานไอออไนเซชัน (Ionization Energy, IE)

$\{ 2N^+ + 2e^- \}$ คือ ก๊าซแตกตัว (Ionized Gas) และอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในสถานะพลาสมา

2.4.1 พลังงานสลายพันธะ

พลังงานพันธะ (Bond Energy) คือ ปริมาณของพลังงานที่ต้องการใช้ในการทำลายพันธะเคมีออกเป็นส่วนที่ไม่มีพันธะหรือเป็นธาตุอะตอมเดี่ยว พลังงานพันธะของธาตุชนิดต่างๆแสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงค่าพลังงานสลายพันธะของธาตุชนิดต่างๆ

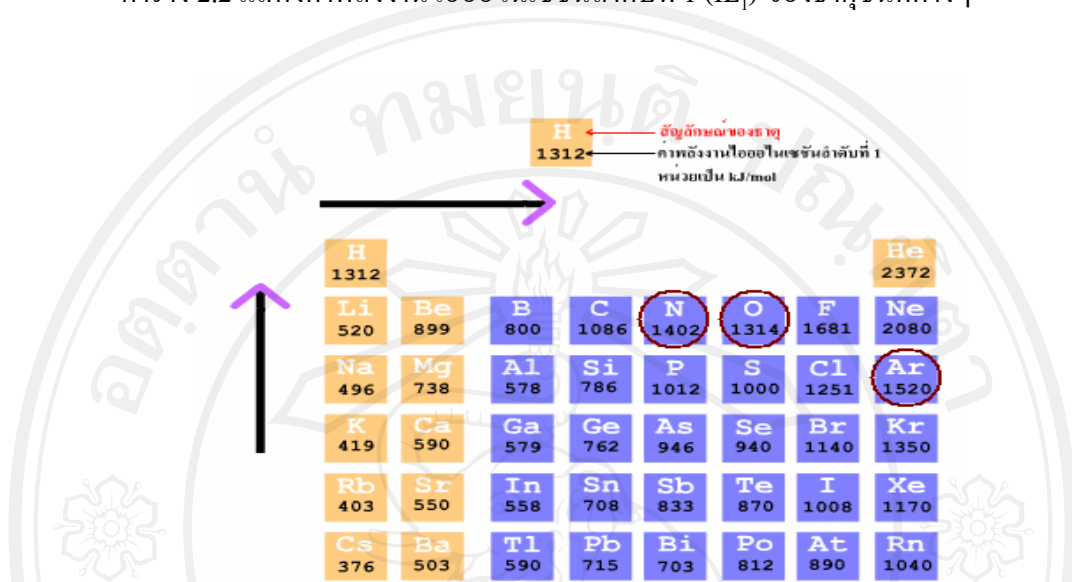
Bond	D (kJ/mol)	r (pm)	Bond	D (kJ/mol)	r (pm)
N-N	167	145	O-O	142	148
N=N	418	125	O=O	494	121
N≡N	942	110	O-F	190	142
N-O	201	140	S=O	522	143
N=O	607	121	S-S (S ₈)	226	205
N-F	283	136	S=S	425	149
N-Cl	313	175	S-F	284	156

2.4.2 พลังงานไอออไนเซชัน

พลังงานไอออไนเซชัน (Ionization Energy, IE) คือ ค่าพลังงาน ที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุด (Valance Electrons) หลุดออกจากอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะก๊าซ

อะตอมของธาตุแต่ละชนิดจะมีค่าพลังงานไอออไนเซชันแตกต่างกัน และแต่ละอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันก็มีค่าพลังงานไอออไนเซชันได้หลายค่าเช่น IE_1, IE_2, IE_3, \dots คือ ค่าพลังงานในการดึงอิเล็กตรอนตัวที่ 1, 2, 3, ... ตามลำดับ โดยอิเล็กตรอนที่มีลำดับมากขึ้นก็จะใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมของธาตุนั้น

ตาราง 2.2 แสดงค่าพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 (IE₁) ของธาตุชนิดต่างๆ



2.5 การถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของของไหลเกี่ยวข้องกับระบบสมการที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์แบบต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation), สมการโมเมนตัม (Momentum Equation) และสมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation) เป็นต้น

2.5.1 สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่องมีนิยามว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุมจะเท่ากับผลต่างของมวลที่ไหลเข้า-ออกปริมาตรควบคุม

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.6)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
- $\frac{\partial u}{\partial x}$ คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน X (m/s)
- $\frac{\partial v}{\partial y}$ คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน Y (m/s)

$\frac{\partial w}{\partial z}$ คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน Z (m/s)

2.5.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

สมการโมเมนตัมมีนิยามว่า ผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม จะต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.9)$$

เมื่อ μ คือ ค่าความหนืดของของไหล (kg / m.s)
 g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m / s²)
 p คือ แรงที่กระทำกับพื้นผิว (N)

2.5.3 สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equation)

สมการการอนุรักษ์พลังงานมีนิยามว่า ผลรวมของพลังงานที่ถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุม กับพลังงานที่สร้างขึ้นภายในปริมาตรควบคุมจะเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ถ่ายเทออกจากปริมาตรควบคุมกับพลังงานที่ถูกสะสมไว้ภายในปริมาตรควบคุม

$$\rho Cp \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \cdot \quad (2.10)$$

ซึ่ง $(\rho = \rho(P, T), Cp = Cp(T))$

เมื่อ	K	คือ ค่าการนำความร้อน (W/m-K)
	q	คือ อัตราความร้อน (W/m ³)
	T	คือ อุณหภูมิ (°C)

ในปัจจุบันการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของของไหลนิยมใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ซับซ้อนคือโปรแกรม Computational Fluid Dynamic (CFD) การใช้โปรแกรมนี้ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองการไหลและกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ผลต่อไป ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองการไหล 2 มิติ ซึ่งกำหนดให้การไหลเป็นแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady State) โดยใช้หลักการ Finite volume วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเพื่อนำผลอุณหภูมิของ Carrier Gas ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเปลวพลาสมาที่วัดได้จากการทดสอบจริง