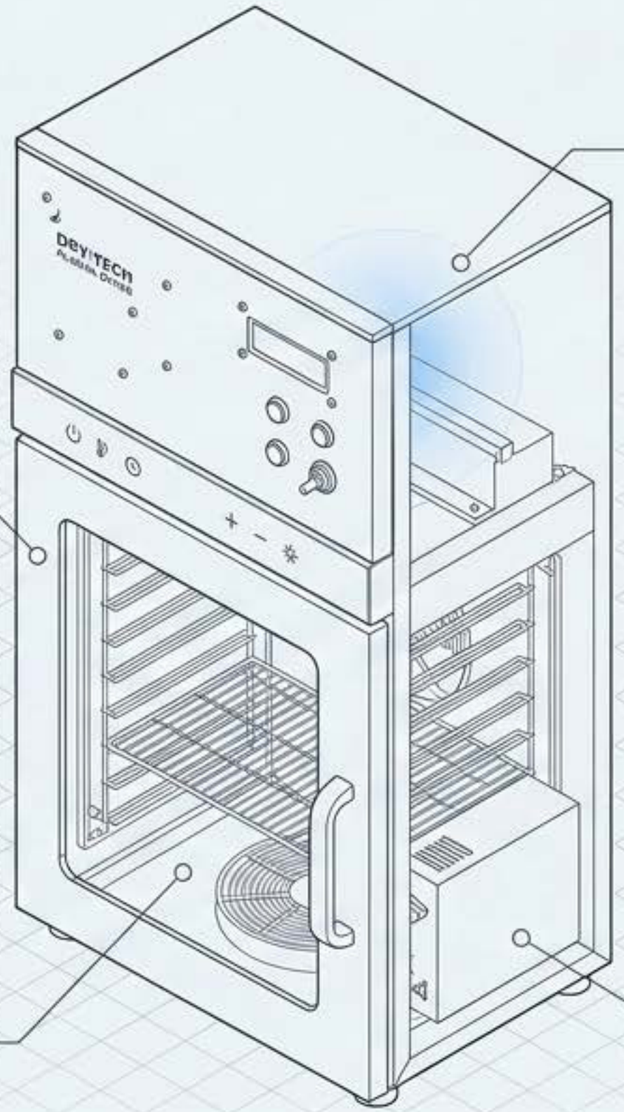
สถาปัตยกรรมการอบแห้งและฆ่าเชื้อด้วยพลาสมาเย็น: ถอดรหัสเทคโนโลยี Plasma Dry-Tech

จากทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมระดับจุลภาคสู่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร

เอกสารทางเทคนิค: กลไกการทำงาน ประสิทธิภาพ และปฏิกิริยาชีวเคมี

การเปลี่ยนผ่านกระบวนทัศน์: ใช้ "พลังงานประจุไฟฟ้า" แทน "ความร้อน"

Plasma Dry-Tech คือเทคโนโลยีอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่ใช้พลังงานจาก Cold Plasma (Non-thermal Plasma) กระตุ้นให้อากาศแตกตัวเป็นอนุภาคมีประจุ (RONS) เพื่อระเหยน้ำและยับยั้งจุลชีพ โดยไม่ทำลายโครงสร้างผลิตภัณฑ์



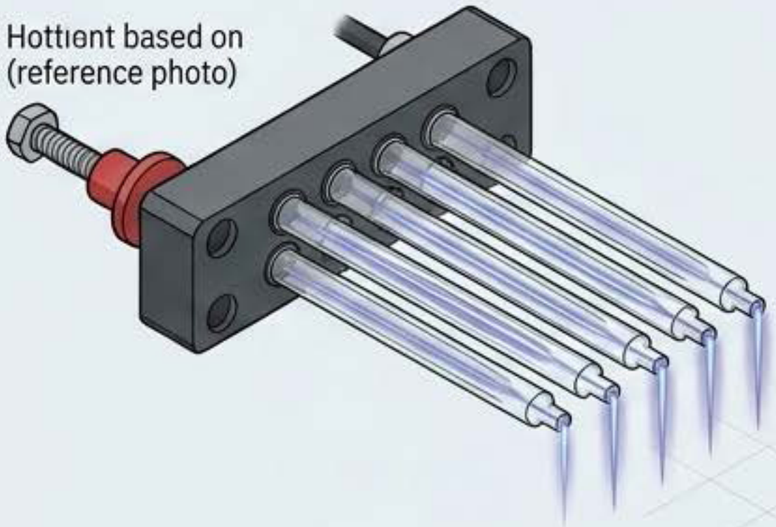
ต้นกำเนิดพลังงาน:
ชุดหัว Streamer Discharge Plasma Jet (Glow-Like Discharge)

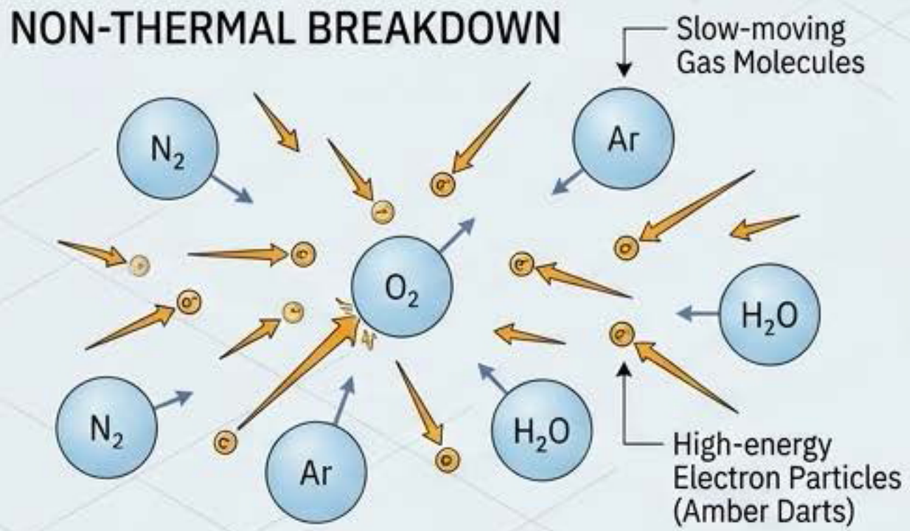
โครงสร้างหลัก:
ห้องอบสแตนเลสแบบปิด (Closed Loop) ขนาด 8-12 ถาด

อุณหภูมิใช้งาน:
ควบคุมไม่เกิน 45 °C (รักษาคุณภาพชีวภาพ)

พลังงานรวม:
ประหยัดพลังงานสูง ใช้ไฟเพียง 60-130 วัตต์

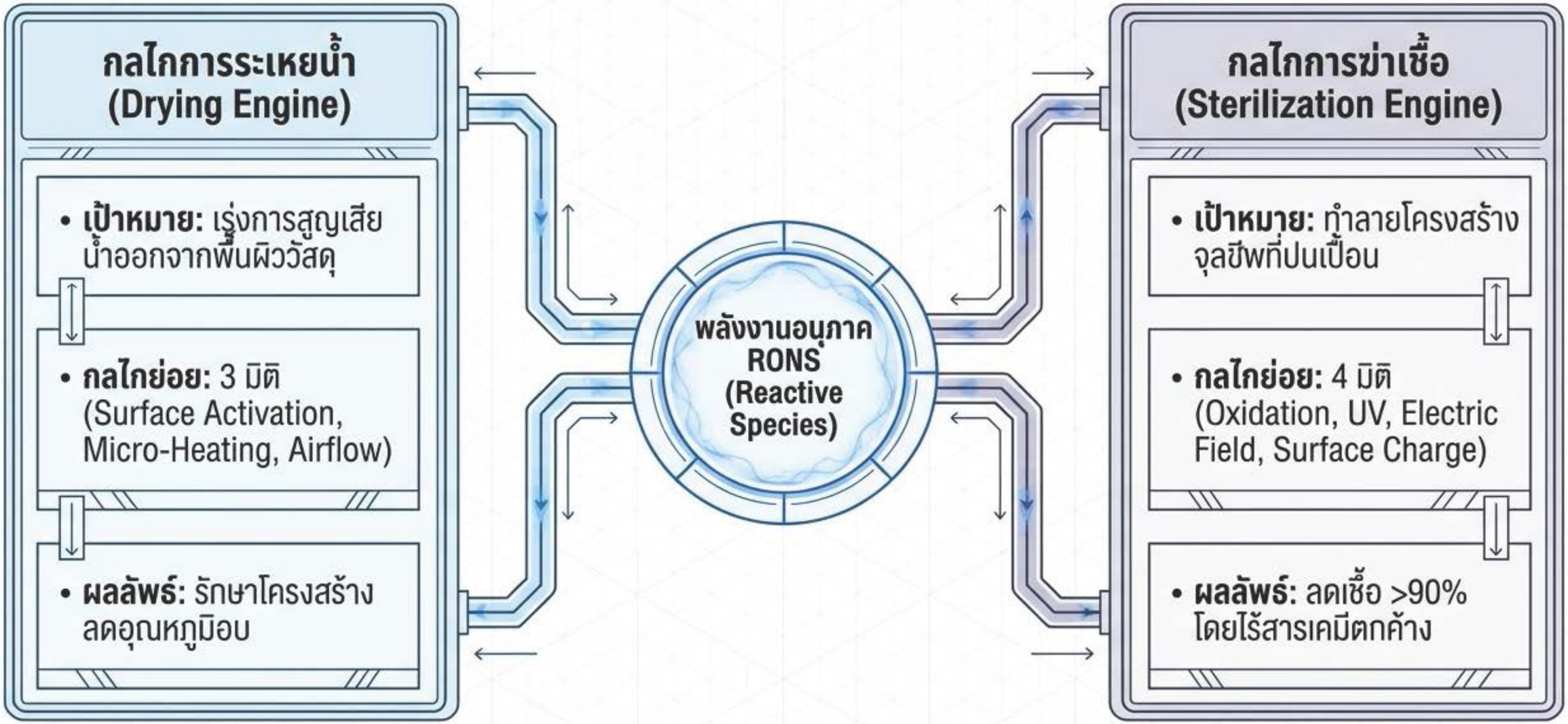
Streamer Discharge Jet: แหล่งกำเนิดพลาสมาแบบไม่ใช้ความร้อน





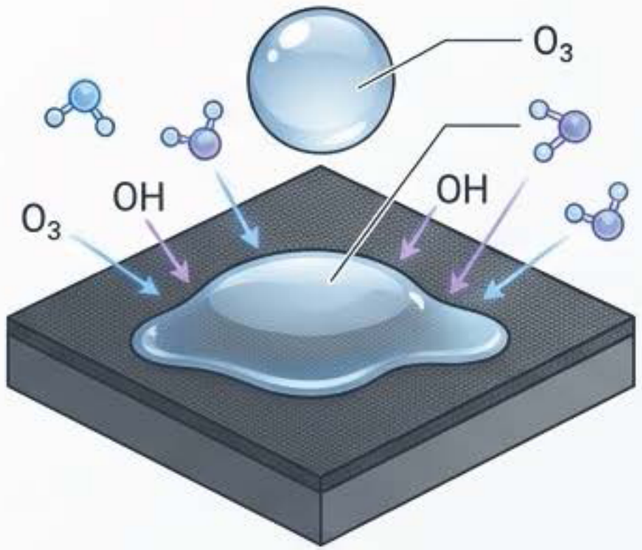
ต้นทาง (Input):	อากาศทั่วไป (Air Plasma: ~78% N_2, ~21% O_2, ~1% Ar + H_2O trace) + พลังงาน 60–130 W
สถานะพลาสมา (State):	โหมด Non-thermal Streamer
กลไกอุณหภูมิ (The Paradox):	อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมาก (High-energy e^-) แต่ส่งผ่านความร้อนให้ก๊าซน้อยมาก ทำให้ก๊าซโดยรวมอุณหภูมิต่ำ (Gas temperature: $T_g \approx 30–60$ °C)
ผลผลิต (Output):	ก่อให้เกิดกลุ่มอนุภาค Reactive Oxygen and Nitrogen Species (RONS) สองกลุ่มหลัก

กลไกขับเคลื่อนคู่ขนาน: กระบวนการเดียวสร้างสองผลลัพธ์ทางชีวภาพ



กลไกการระเหย 3 มิติ: เร่งการสูญเสียน้ำโดยไม่พึ่งพาความร้อนสูง

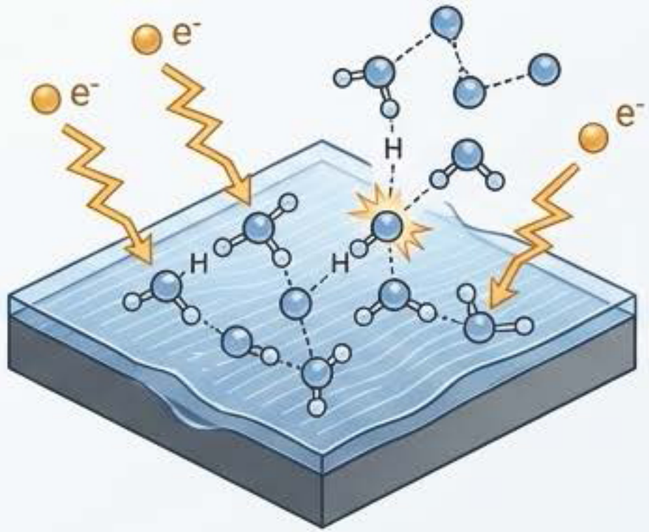
Surface Activation



การทำงาน: อนุภาค RONS (OH· และ O_3) ทำปฏิกิริยากับหมู่ hydroxyl บนผิววัสดุ

ผลลัพธ์: เปลี่ยนสภาพผิวให้เป็น Hydrophilic (ลดมุมสัมผัสน้ำ) น้ำกระจายตัวเป็นฟิล์มบาง ระเหยออกง่ายขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

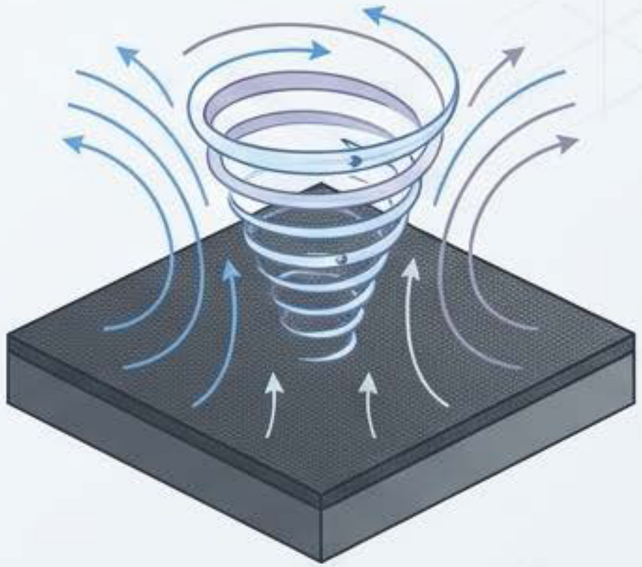
Micro-Heating & Energy Transfer



การทำงาน: การชนของ e^- และไอออนสร้างพลังงานเฉพาะจุด (Localized energy)

ผลลัพธ์: โมเลกุลน้ำแตกตัวและหลุดจากพันธะไฮโดรเจน (H-bond) เกิด "Micro-evaporation" ช่วยระเหยแม้อุณหภูมิต่ำกว่า 45 °C

Plasma-Induced Airflow & Charge

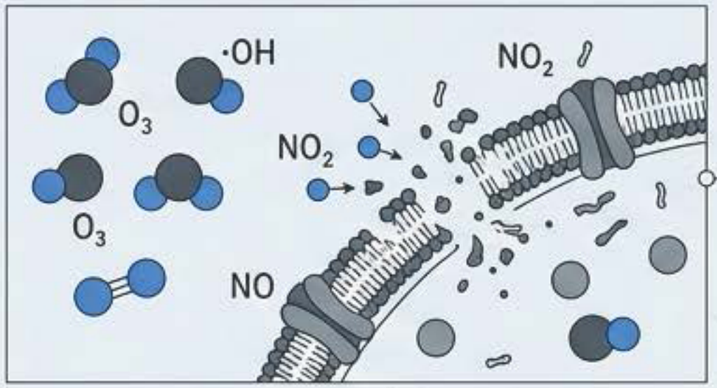


การทำงาน: การแตกตัวของอากาศสร้างแรงผลักประจุ (Ionic wind) และ Micro-vortex

ผลลัพธ์: กระตุ้นการไหลเวียนระดับจุลภาค เพิ่ม Mass transfer ระหว่างผิววัสดุและอากาศในห้องอบ

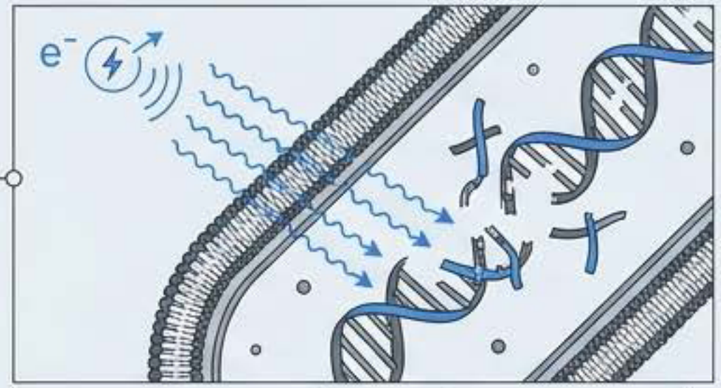
การโจมตีจุลชีพ 4 ทิศทาง: กลไกยับยั้งการเจริญเติบโตที่ไร้สารเคมี

1. Oxidative Attack

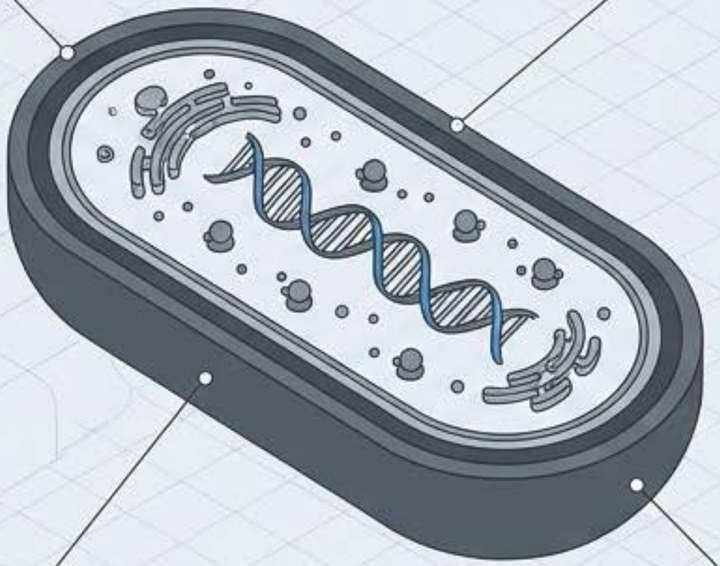


RONS (O_3, ·OH, NO_2, NO) เข้าทำลายผนังเซลล์
Lipid membrane และโปรตีนของจุลชีพโดยตรง

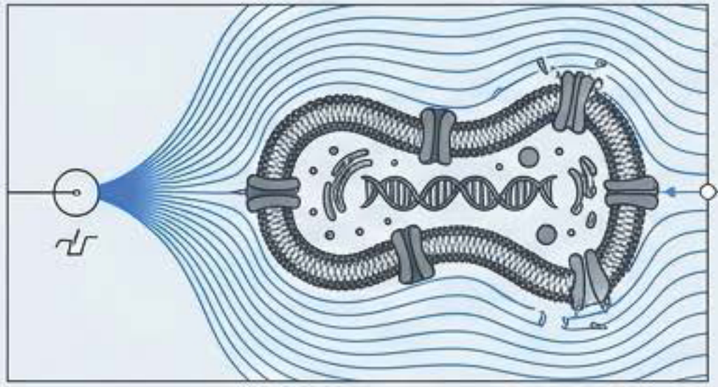
2. UV Emission



การคายพลังงานของ e^- ในอากาศสร้างแสง UV-C ระยะสั้น
แทรกซึมเข้ายับยั้งการแบ่งตัวของ DNA และ RNA

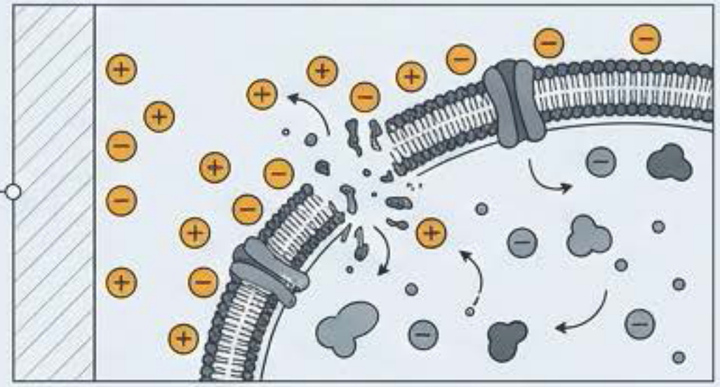


3. Electric Field Effect



สนามไฟฟ้าความเข้มสูงบริเวณใกล้หัว Streamer
บิดเบือนโครงสร้างโปรตีนและทำให้เยื่อหุ้มเซลล์เสียรูปทรง

4. Surface Charging



ประจุบวก-ลบสะสมบนผิววัสดุ สร้างศักย์ไฟฟ้าสูงเฉพาะจุด
ทำให้เชื้อโรคสูญเสียสมดุลไอออนภายในเซลล์และตายลงในที่สุด

รหัสเคมีพลาสมา (RONS Matrix): สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

Category: Reactive Oxygen Species (ROS) - จาก O_2, O_3, H_2O

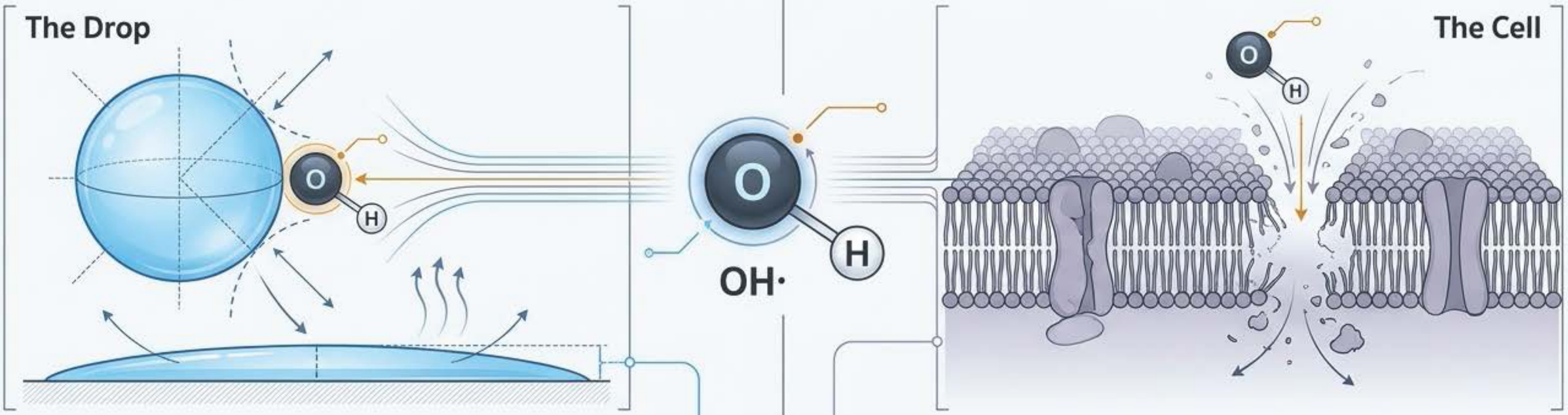
$O\cdot$ Atomic Oxygen	ออกซิไดซ์ผิววัสดุ / ทำให้ผิวเป็น Hydrophilic
$OH\cdot$ Hydroxyl Radical	ออกซิเดชันแรงสุด (Half-life สั้นแต่ผลสูง) ทำลายพันธะ
O_3 Ozone	ฆ่าเชื้อหลักและออกซิไดซ์สารอินทรีย์
$^1O_2$ Singlet Oxygen	ทำลายโปรตีนและเมมเบรนจุลชีพ
H_2O_2 Hydrogen Peroxide	สะสมในเฟสของเหลว (Condensate) ช่วยฆ่าเชื้อ

Category: Reactive Nitrogen Species (RNS) - จาก N_2, O_2

$NO\cdot$ Nitric Oxide	ฆ่าเชื้อ / สร้างสารตั้งต้นในของเหลว
$NO_2\cdot$ Nitrogen Dioxide	ออกซิเดชันต่อเนื่อง / ยับยั้งจุลชีพอย่างเด็ดขาด
N_2O, N_2O_5 Nitrous Oxide / Dinitrogen Pentoxide	ตัวกลางสร้างกรดไนตริก
HNO_2 / HNO_3 Nitrous / Nitric Acid	ลดค่า pH บนพื้นผิว เพิ่มคุณสมบัติฆ่าเชื้อแบบยั่งยืน

จุดตัดทางวิศวกรรม: ปฏิกิริยาเดียว ผลลัพธ์คู่ขนาน

Insight Statement: ความเหนือชั้นของ Plasma Dry-Tech ไม่ใช่การนำระบบอบแห้งมาต่อรวมกับระบบฆ่าเชื้อ แต่คือการใช้ "พลังงานก้อนเดียวกัน" สร้างอนุภาค RONS ที่ทำหน้าที่ 2 ประการพร้อมกันในระดับโมเลกุล



พลังงานเพื่อการระเหย (Drying)

กลไกบนโมเลกุลน้ำ: OH· และ O_3 เข้าลดแรงดึงผิว ร่วมกับ Atomic O ทำให้ผิววัสดุมีคุณสมบัติ hydrophilic ส่งผลให้น้ำแผ่ออกและระเหยเร็วขึ้นในอุณหภูมิต่ำ

พลังงานเพื่อการทำลาย (Sterilization)

กลไกบนเซลล์จุลชีพ: อนุภาคกลุ่มเดียวกัน (O_3, $^1O_2$, NO_2·) เข้าทำลายผนังเซลล์จุลชีพโดยตรง สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ลงได้มากกว่า 90% โดยไม่ทิ้งสารเคมีอันตรายตกค้าง

พลศาสตร์เชิงพื้นที่: กลไกเปลี่ยนผ่านตามระยะห่าง cononeal Stones (Plume Length Gradient)

Core Zone: 0 – 5 mm

Plume Zone: 5 – 20 mm

Chamber Zone: > 20 mm (ระดับห้องอบใหญ่)

กลไกเด่น: ฆ่าเชื้อโดยตรงด้วย $e^- + UV + O\cdot + OH\cdot$

ประสิทธิภาพ: 99.9% โจมดีเฉียบพลัน

กลไกเด่น: ออกซิเดชันบนพื้นผิวด้วย $O_3 + OH\cdot + {}^1O_2$

ประสิทธิภาพ: 90 – 99%

กลไกเด่น: ฆ่าเชื้อแบบ Indirect อาศัยผลสะสมของ $O_3 + NO_2 + H_2O_2$

ประสิทธิภาพ: 70 – 90%

ยิ่งระยะห่างมาก **สนามไฟฟ้าและ e^- จะลดลง แต่ระบบจะชดเชยด้วยการสะสมของ "RONs ชนิดเสถียร"** (เช่น Ozone ที่มีครึ่งชีวิต 30-40 นาที และ HNO_3) ที่กระจายทั่วห้องอบ

การสเกลระบบสู่ระดับอุตสาหกรรม: การกำจัดจุดบอดในห้องอบ (Zero Dead-Zones)

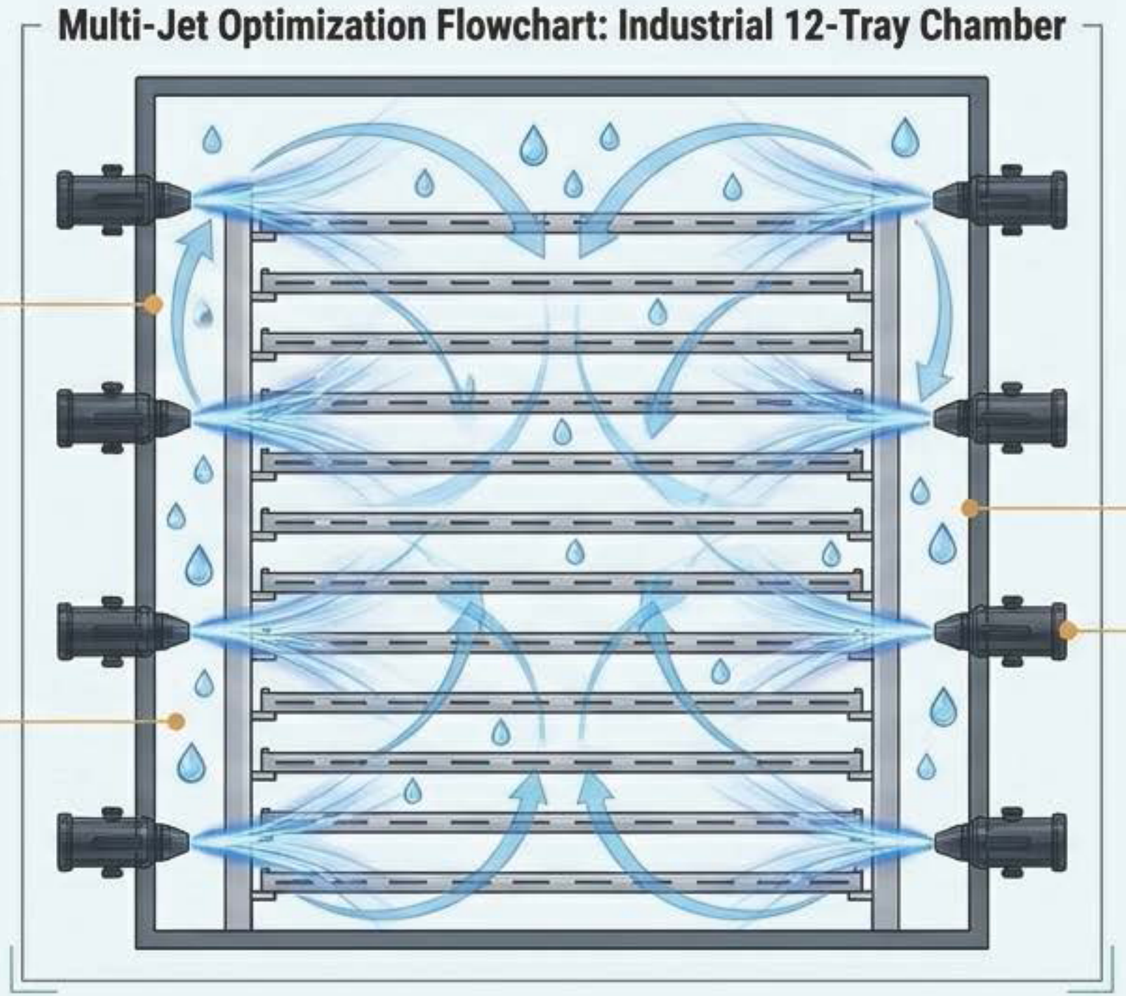
การทำงานในตู้อบขนาดใหญ่ที่หัวเจ็ตห่างออกไปหลาย 10 ซม. ต้องอาศัย 4 ปัจจัยในการสร้างสภาพแวดล้อมที่สมบูรณ์แบบ

Factor 1: Forced Airflow (การหมุนเวียนอากาศ)

พัดลมช่วยกระจาย O_3 และ NO_2 ให้แทรกซึมทั่วถึงทุกชั้นถาด

Factor 2: Relative Humidity (ความชื้น 40-60%)

ความชื้นในอากาศคือวัตถุดิบสำคัญ ปฏิกิริยา $e^- + H_2O$ ช่วยสร้าง H_2O_2 และ $OH\cdot$ ปริมาณมหาศาล



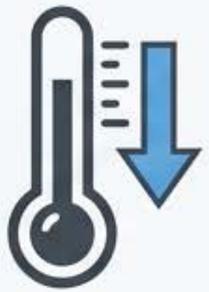
Factor 3: Overlapping Plumes (หัว Jet หลายจุด)

การจัดเรียงหัวยิงหลายจุดสร้างพื้นที่ซ้อนทับของ RONS ครอบคลุมปริมาตรห้องอบทั้งหมด

Factor 4: Cumulative Dose (เวลา 30-60 นาที)

ชดเชยการทำงานแบบ Indirect ด้วยระยะเวลา ทำให้ RONS สะสมและออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อได้อย่างสมบูรณ์

บทสรุปทางวิศวกรรม: อนาคตของการแปรรูปด้วยพลาสมาเย็น



อุณหภูมิต่ำ (Thermal Control)

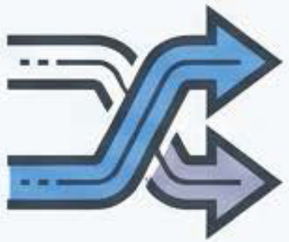
ทำงานที่อุณหภูมิ < 45 °C รักษาโครงสร้างทางกายภาพและสารสำคัญทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้อย่างครบถ้วน

ปราศจากสารเคมี (Chemical-Free)

ใช้เพียง “อากาศ” และ “ไฟฟ้า” สร้าง RONS ที่ฆ่าเชื้อได้ >90% และสลายตัวเป็นก๊าซธรรมชาติโดยไม่ทิ้งสารพิษตกค้าง

ประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency)

ใช้พลังงานไฟฟ้ารวมเพียง 60-130 วัตต์ สร้าง micro-evaporation ที่ลดต้นทุนการใช้พลังงานความร้อนมหาศาล



พลวัตคู่ขนาน (Dual-Action System)

ผสานกระบวนการ “อบแห้ง” และ “**ฆ่าเชื้อระดับสูง** (High-Level Disinfection)” ไว้ในขั้นตอนเดียว ประหยัดเวลาและลดขั้นตอนการผลิต