

# פרקתי במעבדה...

כנס 'חשמל סטטי', האיגוד הישראלי להנדסת בטיחות 28.4.26 עדי חן

תאונות במעבדות מחקר כתוצאה מניצוץ חשמל סטטי

# הפיסיקה של "הזעאץ"

חשמל סטטי מבטא חוסר איזון בין מטענים חשמליים בתוך או על-גבי משטח של חומר. הסיכון טמון באנרגיה שחוסר איזון חשמלי זה פורק.

נקודת הקיצון לסיכון מוות:  $10 \text{ J} <$



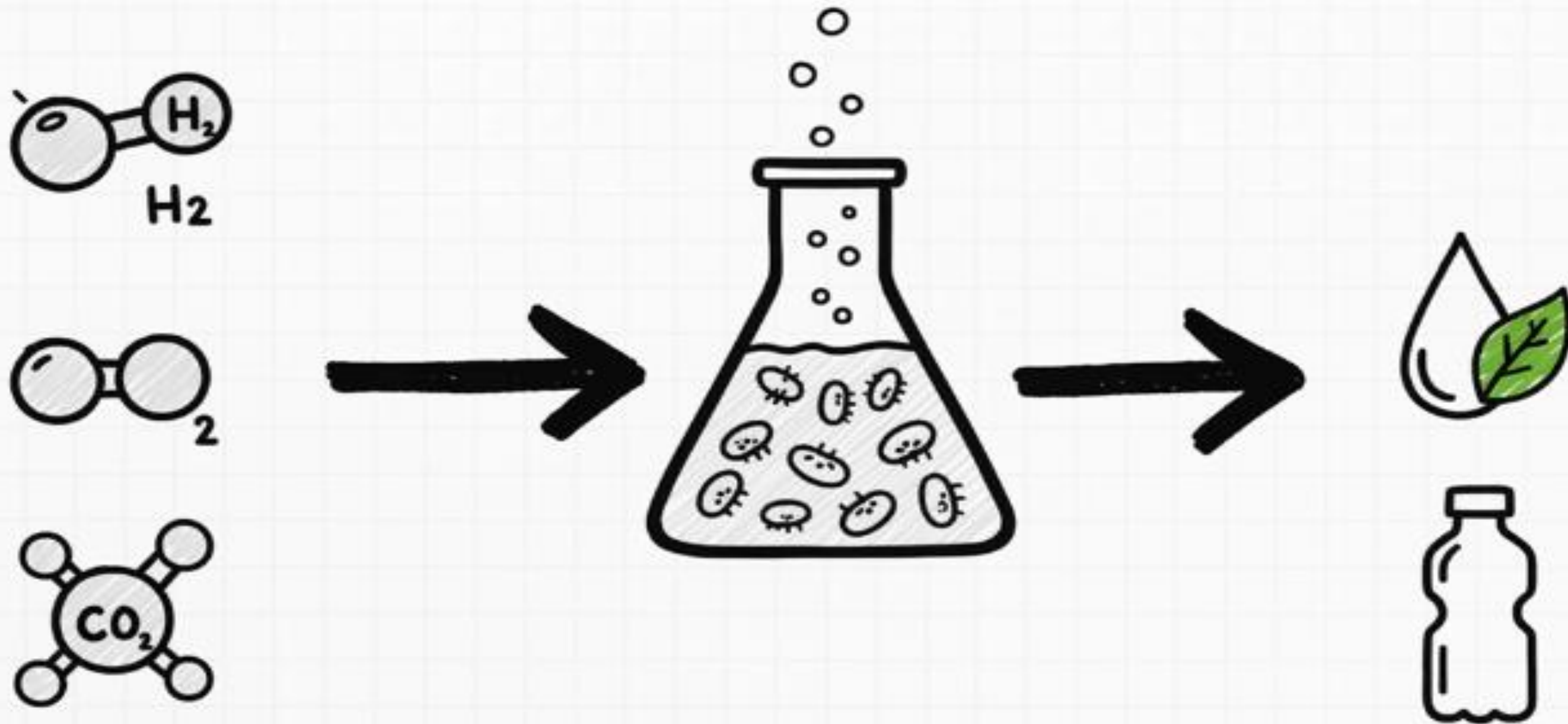
פריקה אלקטרוסטטית בעוצמה זו יכולה לגרום לשבץ משמעותי, חוסר הכרה ובסופו של דבר לדום לב.

הסף האנושי:  $1 \text{ mJ}$



עוצמת האנרגיה המינימלית בה אדם חש בניצוץ (= "זעאץ") או פריקה. זוהי תחושה כמעט לא מובחנת.

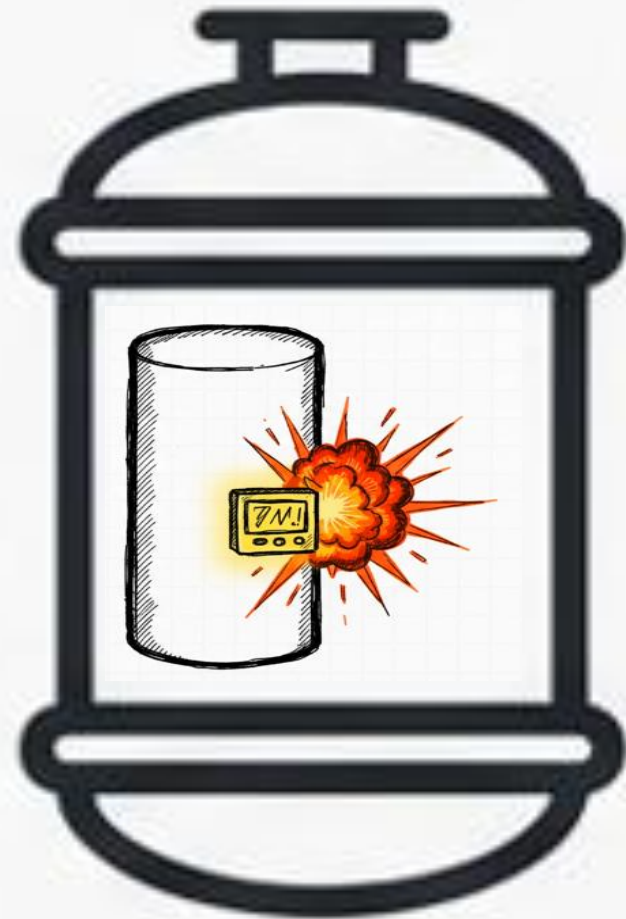
# תאונה #1 : אוניברסיטת הוואי – ביוריאקטור ביולוגי



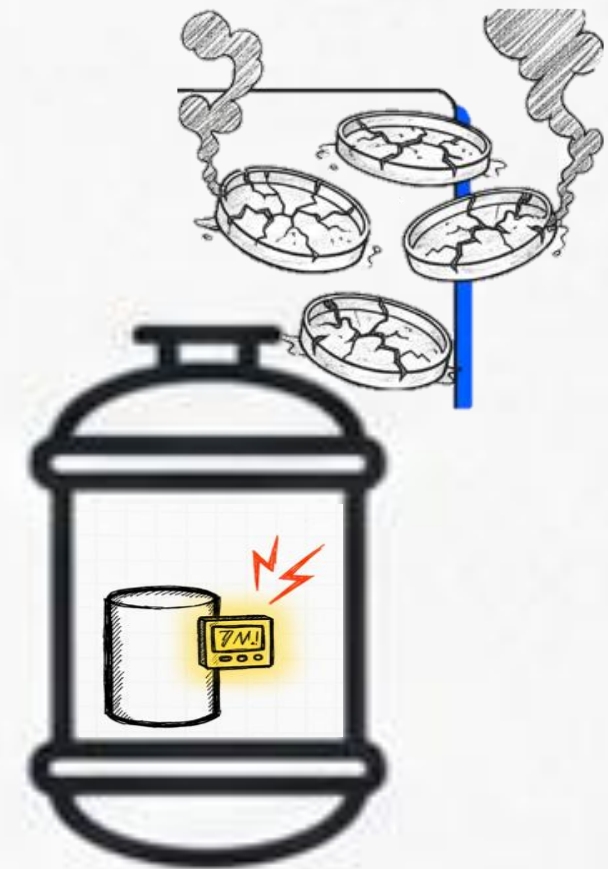
תאונה #1: אוניברסיטת הוואי – ביוריאקטור ביולוגי  
התהליך הטכני

כשל MOC

50 ליטרים



3.5 ליטרים



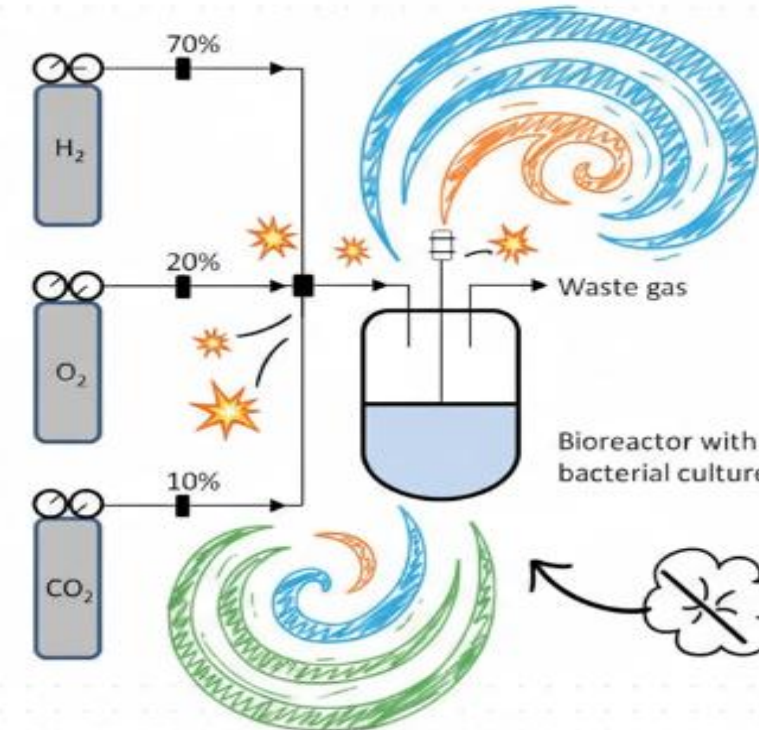
הגדלה הדרגתית של תהליך הביוריאקטור ללא ניהול שינוי (MOC),  
Management Of Change) פורמלי או הערכת סיכונים.

# תאונה #1 : אוניברסיטת הוואי – ביוריאקטור ביולוגי

”כאן חשדתי” (= ה'כמעט-ונפגע')

החוקרת שמעה רעש סדיקה או שבר בתוך מכל הלחץ עימו עבדה כאשר לחצה על כפתור ההדלקה ('On/Off') של מד הלחץ הדיגיטלי של המכל. צלחות הפטרי שהוצאו מהמכל היו שרופות.

אוניברסיטת מנואה בהוואי (UH), מרץ 2016.  
חוקרים עובדים עם חיידקים מזן Knallgas בביוריאקטור ובו תערובת פצצה של  $H_2$ ,  $O_2$  ו- $CO_2$ .



16.3.2016

פיצוץ

15.3.2016

פברואר 2016

תחילת הניסוי

חוסר איתור הסיכון הבלתי נראה כתוצאה מהתפתחות חשמל סטטי באנרגיה של מיקרו-ג'אולים, האירוע המקדים של רעש הסדיקה נחשב כאנומליה במקום פיצוץ הרסני.

# תופעת האי המבודד

**בידוד מסיבי**: הצבע הירוק על המכל פעל כמבודד יעיל מאד בכל התנגדות של כ- $2.2 \text{ G}\Omega$

**חסימת מסלולי פריקה**: אטמים סדוקים במצב תחזוקתי גרוע וסרט טפלוון מבודד בודדו חשמלית את רכיבי מכל הלחץ.

המכל היה מבודד לחלוטין מהאדמה. במקום שיהיה מסלול בטוח לפריקת מטען שיורי, המכל הפך ל**אי בודד** – קבל ענק, המחסן בתוכו מטען אלקטרוסטטי שרק ממתין למסלול פריקה לאדמה.



# כשלים במכל



# הדלק

אווירה נפוצה  
נפיץ מאד,  
תערובת מועשרת-חמצן

55%  $H_2$   
38%  $O_2$   
7%  $CO_2$

# התהליך הטכני

① החוקרת ניגשה למכל ה-50 ליטרים כדי לבצע דה-קומפרסיה בעזרת מד הלחץ הדיגיטלי.

② כאשר החוקרת לחצה על כפתור הכיבוי (= "Off") – ידה באה במגע עם המתכת המוליכה שעל בית מד הלחץ.

③ החוקרת והמכל הכילו פוטנציאליים חשמליים שונים < התרחש מעבר פוטנציאליים.

④ מעבר הפוטנציאליים גרם לפריקת קורונה / "מברשת" בתוך 'גבעולי' מד הלחץ < שחרור אנרגיה ישירות לתוך התערובת הנפוצה שהיתה בתוך המכל.



# התהליך הטכני

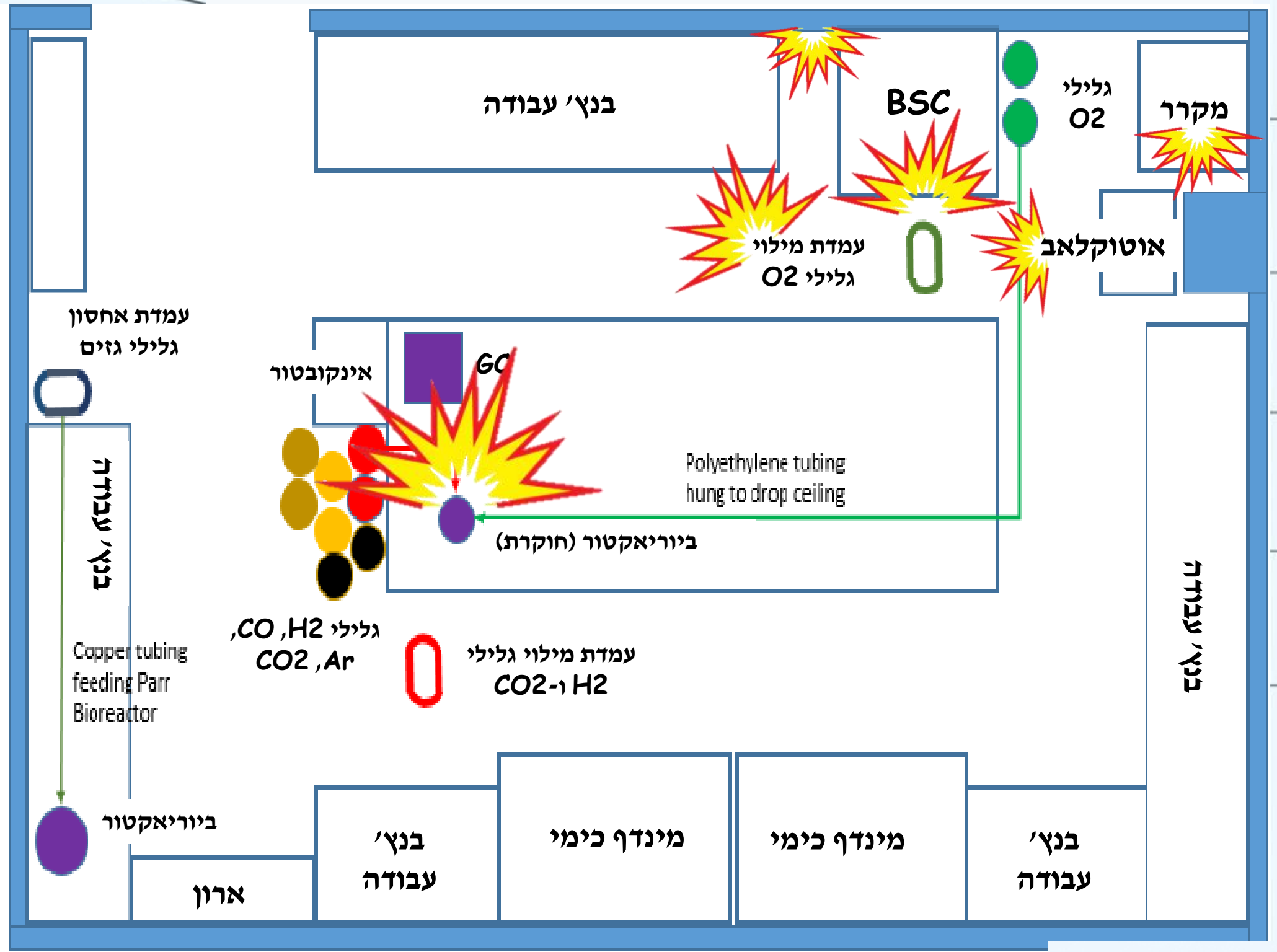


מדי הלחץ הדיגיטלי לא תוכנן,  
לא דורג ולכן גם לא אושר כ-  
IS עבור אווירות נפוצות.

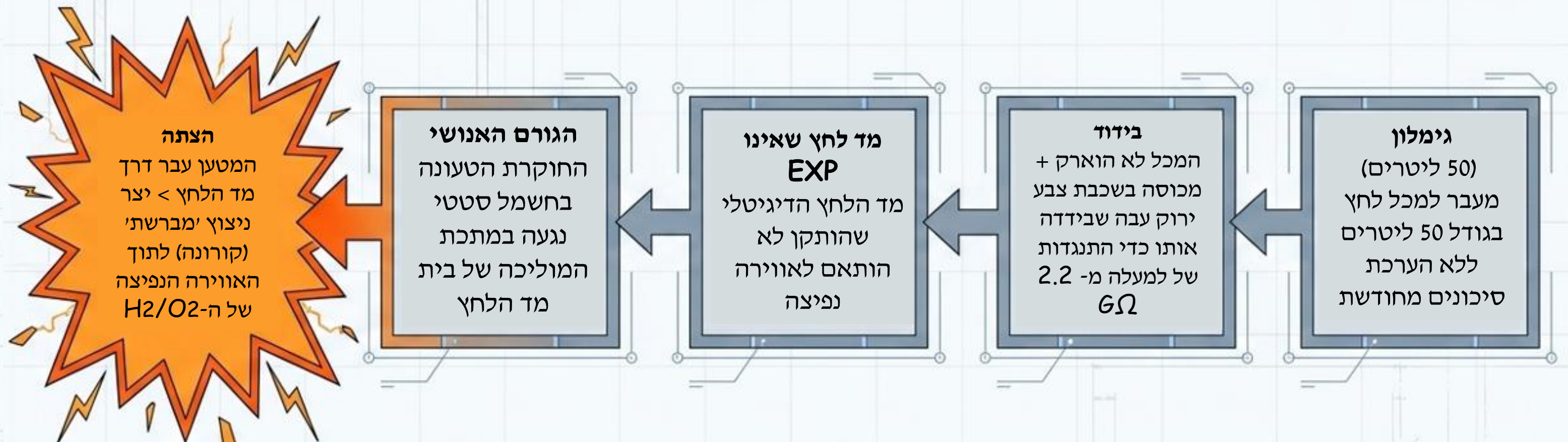
# התוצאה

הפיצוץ היה בעוצמה שוות ערך ל-70.5 גרמים של TNT

- המינדף הביולוגי חטף את מלוא עוצמתו של גל ההלם: חלקו העליון עף לחלוטין והזכוכית ה-Sash התפוצצה.
- חלקי מד הלחץ ומכל הלחץ התפזרו בכל רחבי המעבדה < ניקבו את דלתות המקרר הכבדות.
- זכוכית המינדף הכימי התפוצצה.
- החוקרת ספגה פגיעות בלתי הפיכות.



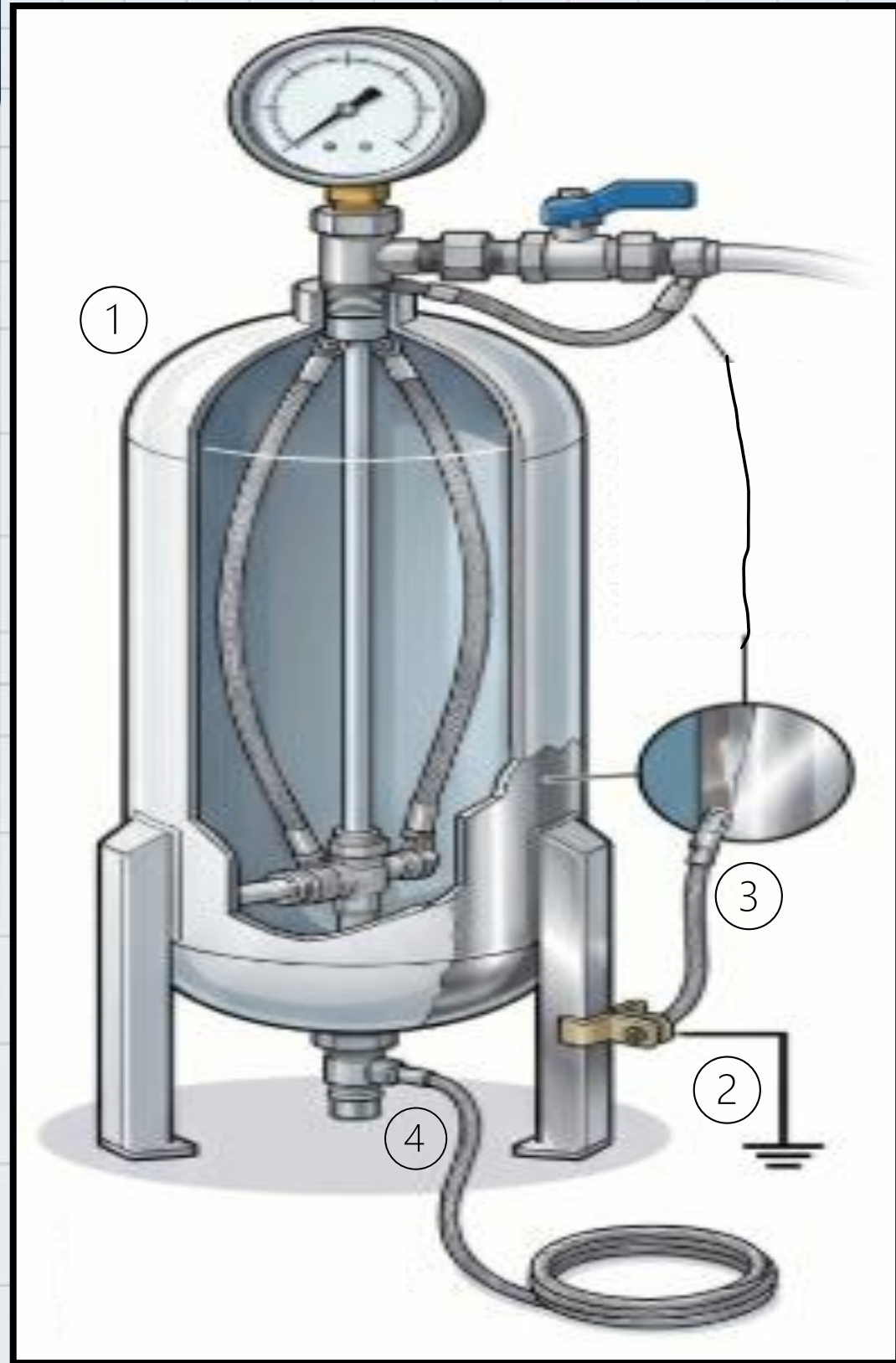
# התהליך הטכני



# התוצאה



# כיצד היה צריך להיראות המכל?



1 הורדת הצבע המבודד מהמכל < ביסוס מגע "נקיי" עם המתכת

2 כבל הארקה ובורג מתכתי לחיבור לאדמה

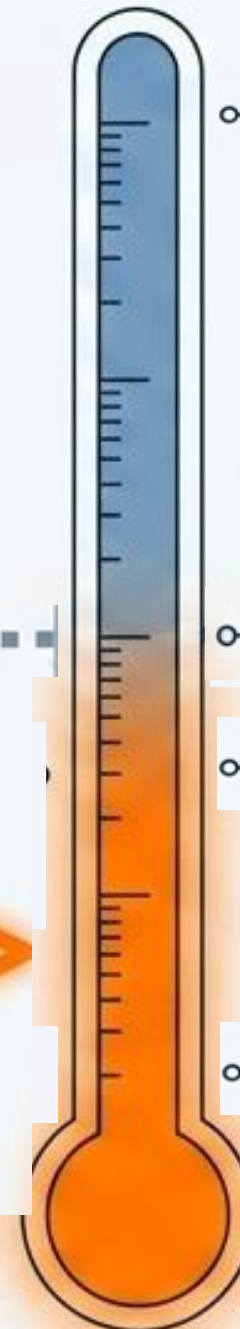
3 כבלים להשוואת פוטנציאלים של הבית המתכתי של מד הלחץ לגוף המכל (במקום הטפלון)

4 מסלול ישיר לאדמה

# הסיכון הבלתי נראה

אנרגיה חשמלית	תגובה פיסיולוגית
1 mJ	מורגש
10 mJ	דקירה
30 mJ	דקירה חדה
100 mJ	רתיעה קלה
250 mJ	שוק חמור
>1 J	אובדן הכרה
> 10 J	דום לב

# הסיכון הבלתי נראה



דום לב:  $10,000 \text{ mJ (10J)}$

סף התחושה האנושית:  $1 \text{ mJ}$  (=הזעאץ)

אנרגיית ההצתה המינימלית של MEK:  $0.53 \text{ mJ}$

אנרגיית ההצתה של תערובת מימן/חמצן:  $0.02 \text{ mJ}$

הסיכון: ניצוץ סטטי מיקרוסקופי שאדם אינו יכול לחוש בו אך שטומן בחובו די אנרגיה כדי ליזום פיצוץ קטסטרופלי בתנאי תערובת אופטימליים של דלק ואוויר.

# תאונה #2: AWE – שריפה בתהליך יצירת לכה

תהליך שיגרת של יצירת לכה: הכנת אצווה של 150 ק"ג לכה עבור חומרי נפץ עתירי-עוצמה בעזרת הוספה ידנית של ניטרוצלולוז יבש למכלים בני 18 ליטרים ובהם ממס MEK.

הדלק: מתיל-אתיל קטון (MEK)

ממס אורגני בעל אדים דליקים  
מאד בעלי אנרגיית הצתה נמוכה  
במיוחד: **0.53 mJ**



המבודד: ניטרוצלולוז יבש (NC)

חומר בעל שטח פנים גבוה (יותר מ- $5 \text{ m}^2/\text{gr}$ ), שמפתח ומאחסן בקלות מטען אלקטרוסטטי





# תאונה #2: מפעל – שריפה בתהליך יצירת לכה

אדם שהולך ע"ג רצפת ויניל בתנאי לחות נמוכה  
מייצר:

# 12,000 Volts

אנרגיות הצתה מינימליות (Minimum MIE, Ignition Energies)

0.02 mJ

H<sub>2</sub>

0.53 mJ

MEK

# תאונה #2: מפעל – שריפה בתהליך יצירת לכה הבידוד

מתקן ה-AWE תוכנן ונבנה מלכתחילה לטיפול בחומרי נפץ, כך שכלל משטרי הולכה חשמלית מתוכננים, לרבות רצפות מוליכות ומיגון כנגד ברקים. בנוסף, העובדים נכנסו למקום רק עם נעליים מוליכות.

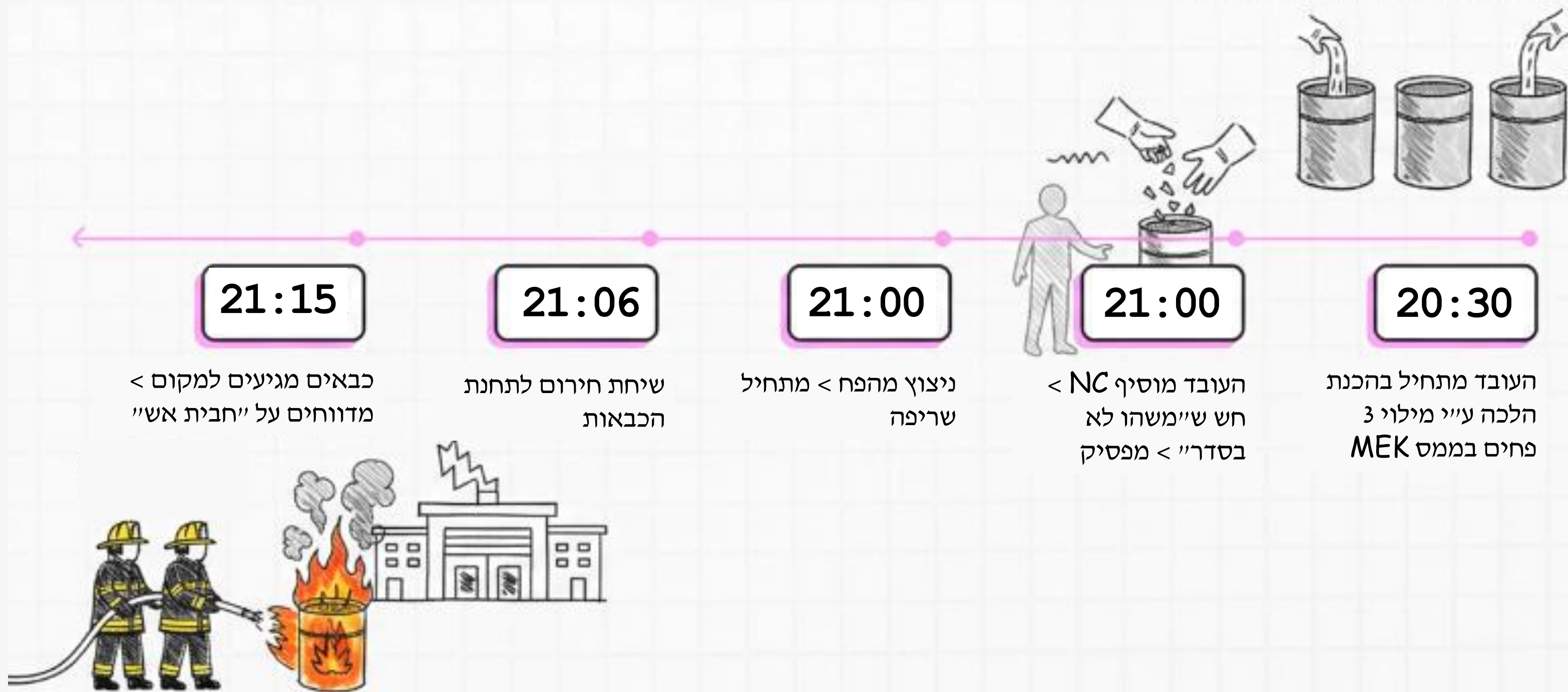


חומרי בידוד מקומיים ניתקו לחלוטין את לולאת ההארקה. ידי המפעיל, המכל והחומר הכימי הפכו ל"איי בידוד" מבודדים, דבר שאיפשר הצטברות של מטען קטלני אף שהעובד עמד על רצפה מוארקת.

מכל HDPE  
High Density  
(PolyEthylene)

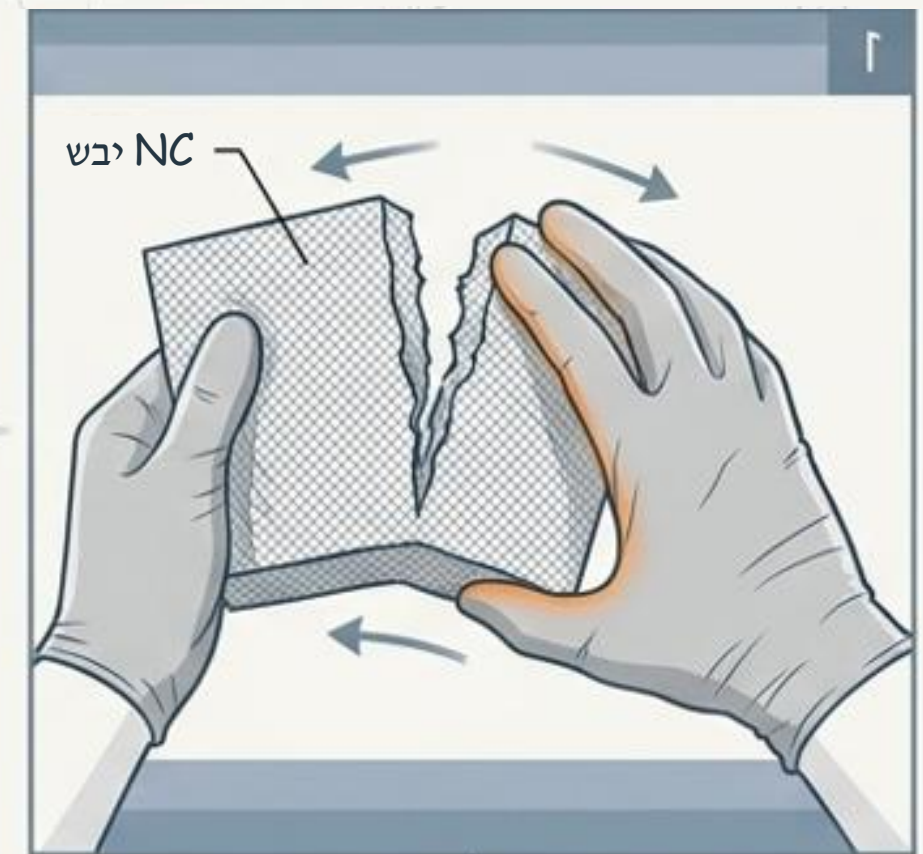
# תאונה #2: מפעל – שריפה בתהליך יצירת לכה

## מהלך האירוע

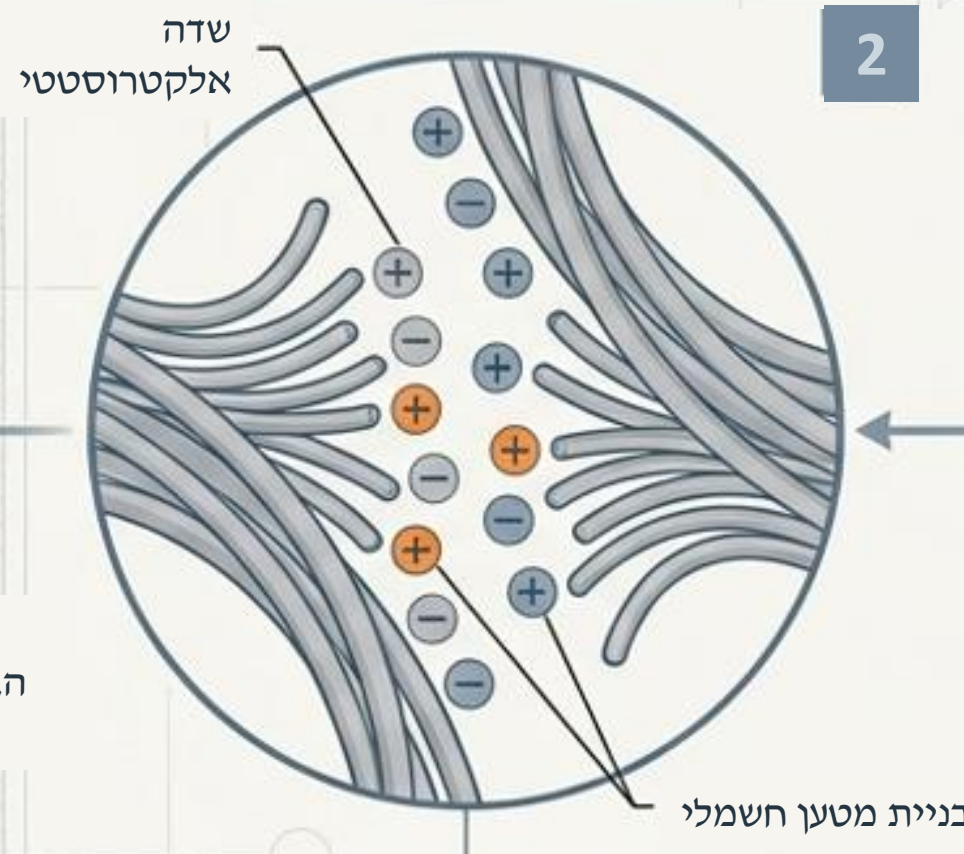


# טעינה טריבואלקטרית וכשל החומרה

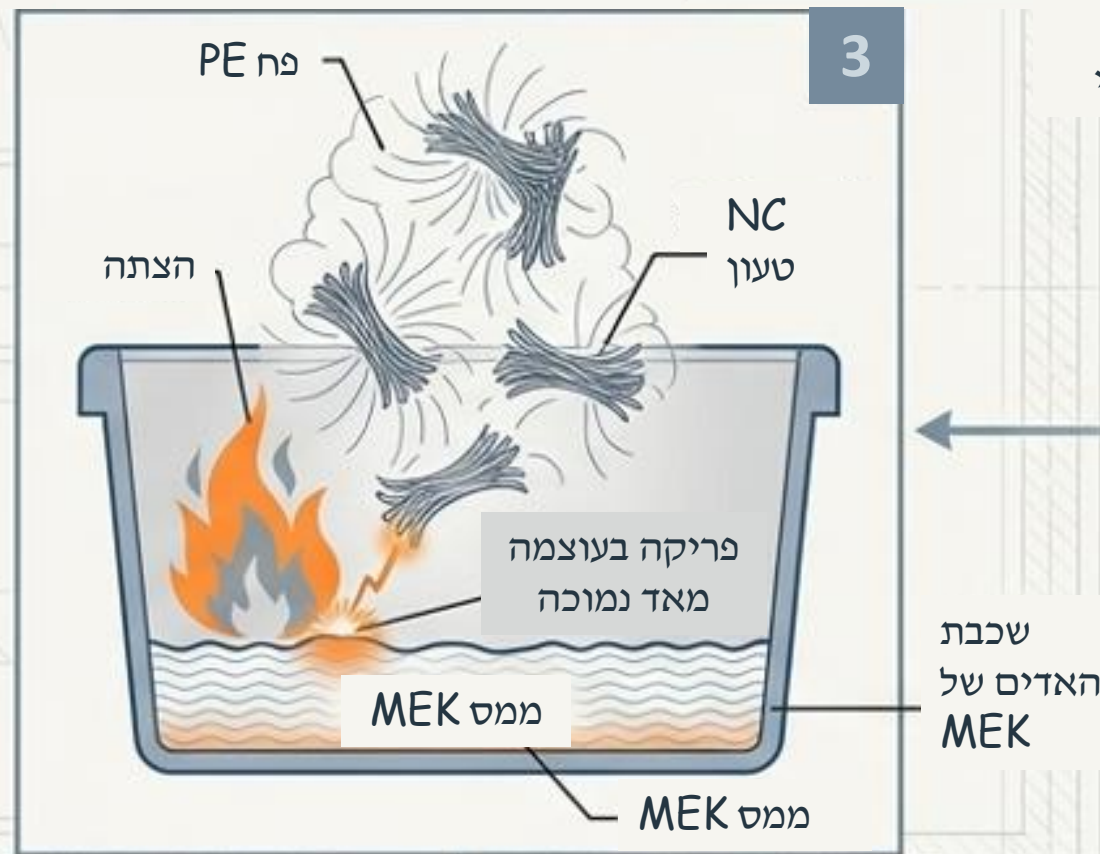
טעינה טריבואלקטרית



**המנגנון:** הפרדת ו"קריעת" ה-NC היבש על-ידי המפעיל יצרה חיכוך, שבתורו יצר מטען אלקטרוסטטי מסיבי.

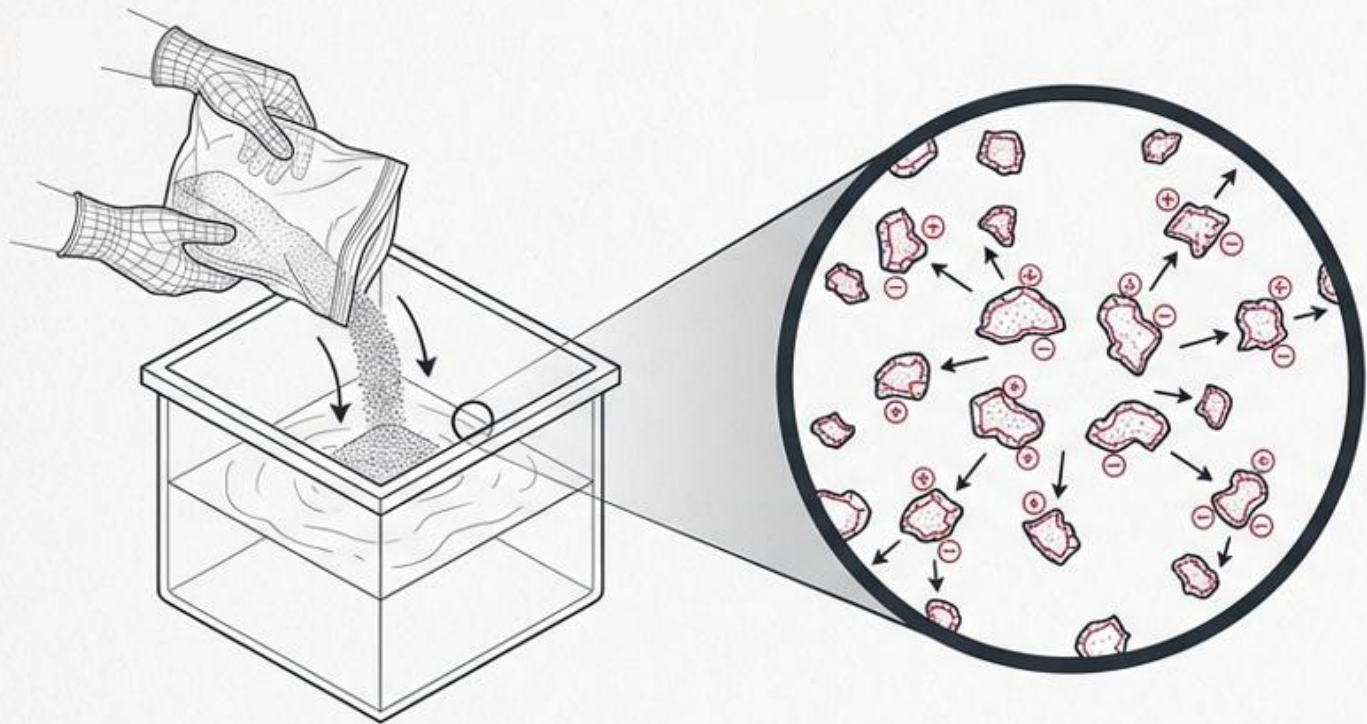


**הכשל ההנדסי:** המתקן השתמש במכלי פוליאתילן. פוליאתילן הוא פלסטיק מבודד מאוד < לא היה למטען האלקטרוסטטי לאן להתפרק.



**ההצתה:** כאשר ה-NC הטעון ביותר "התיישב" על שכבת אדי ה-MEK הדליקים, ניצוץ זעיר בעל עוצמה חלשה מאד, "קפץ" מה-NC < הצית את התערובת.

# תאונה #2: מפעל – שריפה בתהליך יצירת לכה



פרוטוקול חדש

NC יבש

הכנסת סיכון אלקטרוסטטי  
משמעותי כדי להאריך את  
חיי המדף של החומר ללא  
עדכון סיכונים

פרוטוקול ישן

NC רטוב

חומר לא רגיש

הערכות הסיכונים התמקדו בחומרי הנפץ עתירי העוצמה שבחדר הסמוד, ובכך המעיטו באופן מסוכן בהערכת הנדיפות המיידית של תהליך הכנת הלכה עם ה-NC/MEK.



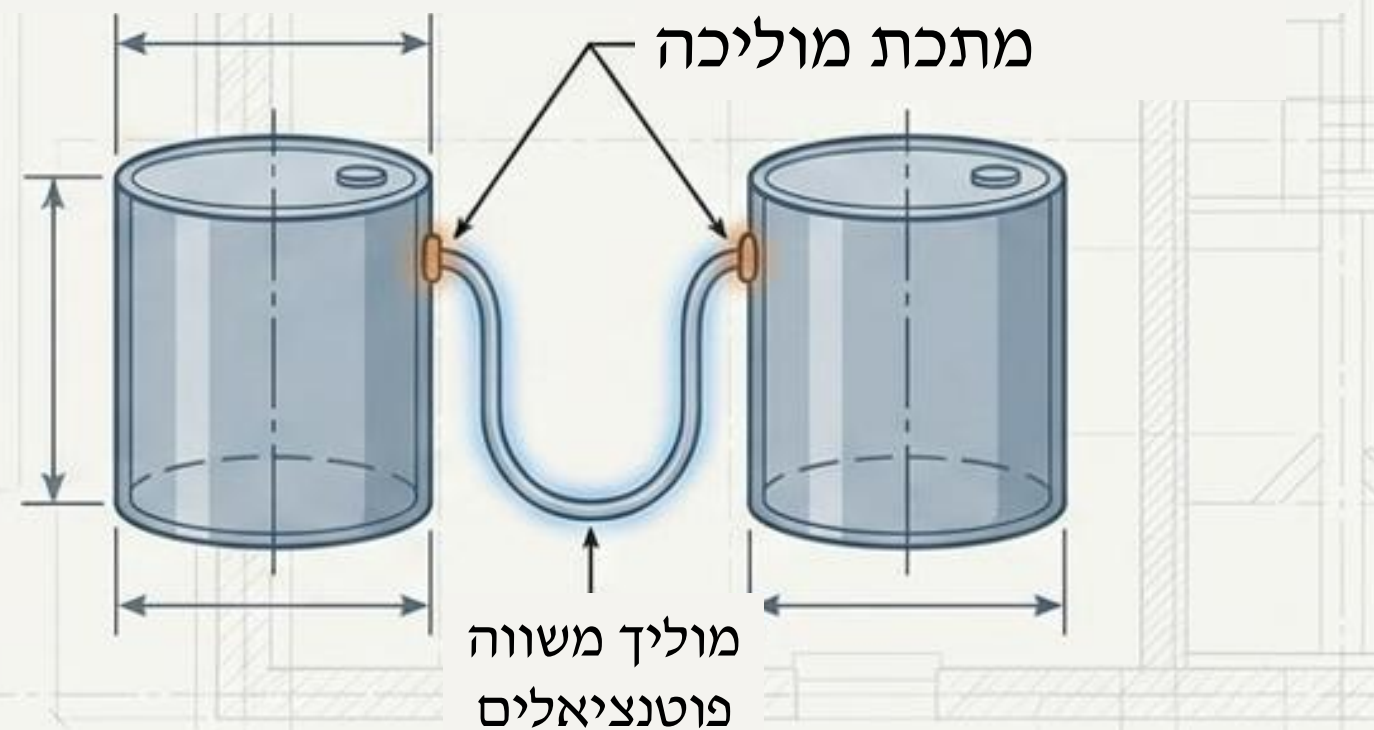
# אנטומיה של 2 התאונות

דלק	מבודד	מנגנון הטענה	מקור הצתה	
תערובת $H_2/O_2$	צבע ירוק ( < $2.2 G\Omega$ )	מכל / מפעיל לא מוארקים	מגע < פריקת ממד הלחץ	הפיצוץ באוני הוואי
אדי MEK	פחי NC / PE יבש	<u>טריבואלקטרי</u> ("קריעת" NC)	NC טעון פרק לתוך תערובת האדים הדליקים	שריפה במתקן

שתי התאונות חייבו התכנסות משתנים, שכללה  
הדלקת מבודד לא מוארק וניצוץ בלתי נראה

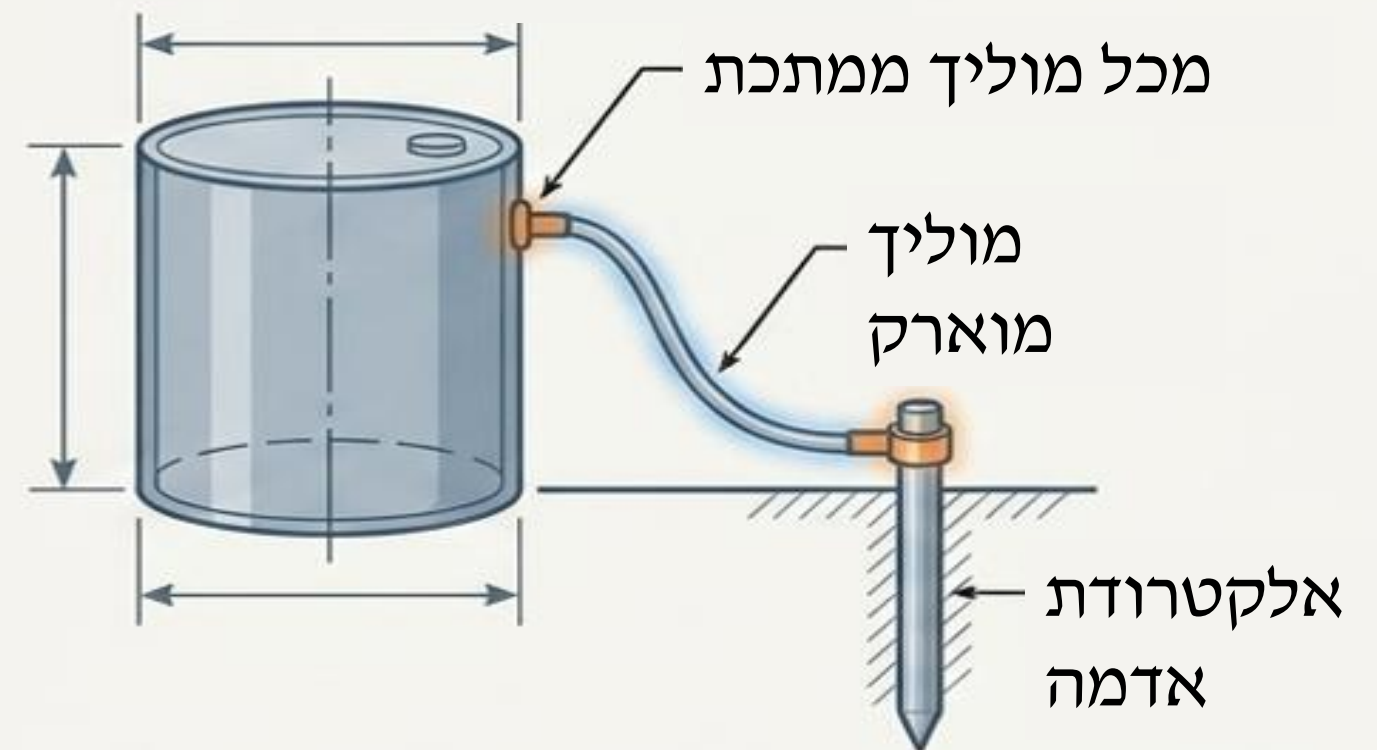
# פתרונות הנדסיים : הארקה או השוואת פוטנציאלים

## השוואת פוטנציאלים



השוואת פוטנציאלים משווה את הפוטנציאל החשמלי בין שני אובייקטים או יותר < ניצוץ חשמלי לא יכול "לקפוץ" בין שני האובייקטים (פיסית).

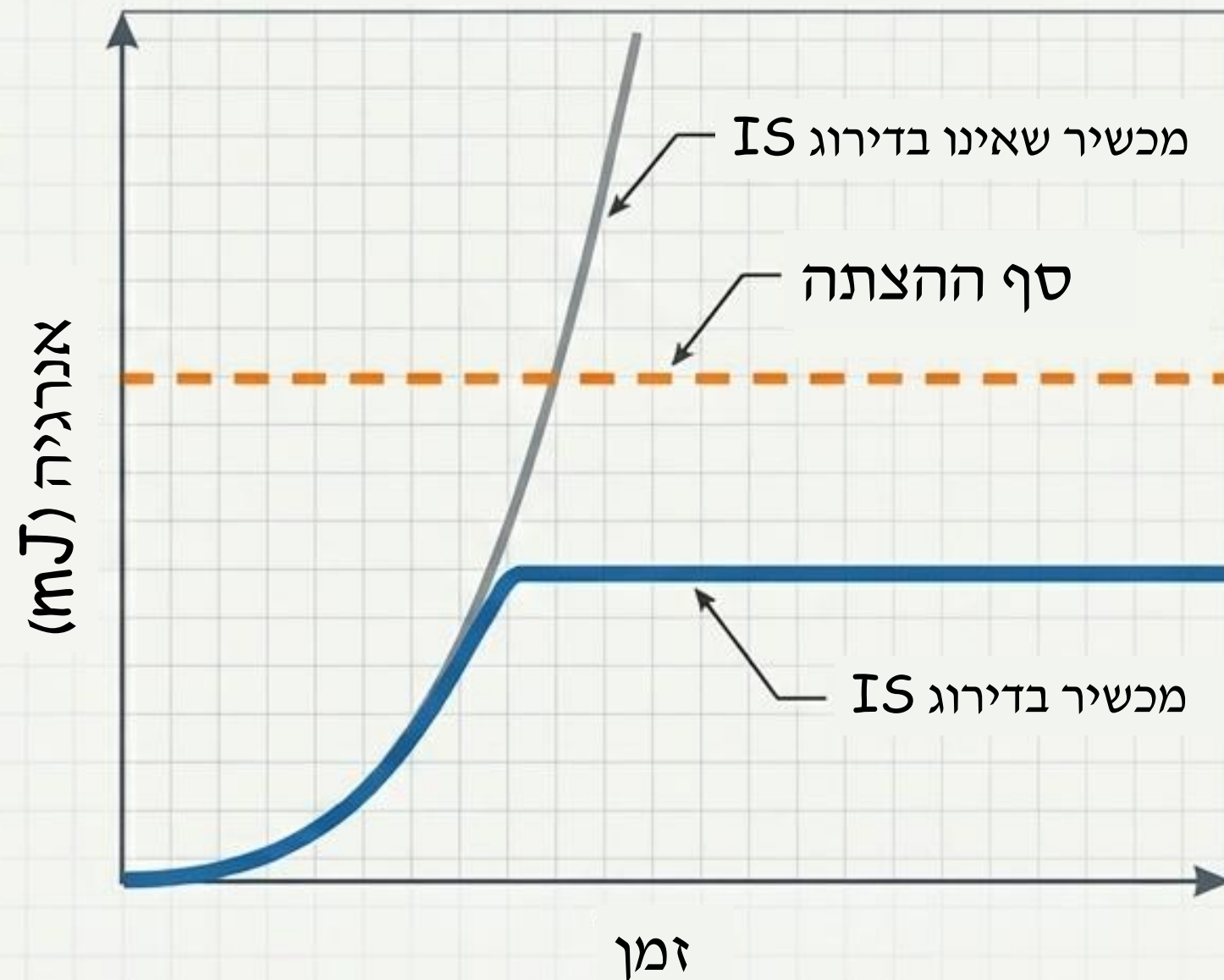
## הארקה



הארקה מספקת מסלול רציף ובטוח לפריקת המטען האלקטרוסטטי ישירות לאדמה < האובייקט שב לפוטנציאל אפס.

# הנדסת בטיחות אינטרינסית (IS, Intrinsic Safety)

## גרף פליטת האנרגיה



## העיקרון

מדד IS לא מעיד ע"כ שהמכשיר חתום ואטום אלא שהמכשיר אינו מסוגל מבחינה מתמטית לשחרר מספיק אנרגיית חום או אנרגיה חשמלית כדי להצית תערובת אטמוספירית כלשהי, גם בתנאים מחמירים.

## היישום

אילו בתאונת UH היו משתמשים במד לחץ בעל דירוג IS, המטען הסטטי שהצטבר בחוקרת היה מוגבל (ונפרק באמצעות קיבול) או מתפזר בבטחה, וע"כ היתה נמנעת פריקת המברשת הפנימית.

# The Ruthlessness of Physics

2,000 ביצועים  
לא בטיחותיים

האשלייה במתקן AWE: תהליך הכנת הלכה בוצע בצורה זזה ובטוחה אלפי פעמים בעבר. המבצעים הניחו שהם בטוחים, בעוד שהם המתינו המשתנים הבלתי נראים ייראו.

ציליל אחד

ממנו התעלמו

האזהרה שניתנה ב-UH: נשמע צליל "סדיקה" / שבר משמעותי יום לפני התאונה, אך מאחר ולא התפתחה שריפה, התעלמו מהצליל.

סיכוני חשמל סטטי חיים בפער המיקרוסקופי שקיים מתחת לתפיסה האנושית. לא ניתן לסמוך על הניסיון האנושי או על החושים כדי לאמת את מידת הבטיחות בפרוצדורה. יש להנדס אותה.



**אם אתה חש ניצוץ, משמע שאתה  
כבר נמצא באיזור הסכנה  
ואם אתה לא חש אותו.... ייתכן שאתה עדיין בסכנה**

הקפדה מחמירה על **הארקה, השוואת פוטנציאלים ובטיחות אינטרינזית** היא המחסום היחיד בין אנרגיות של מיקרוג'אולים לבין אסונות בקנה מידה גדול