

ניתוח כמותי של סיכוני חשמל סטטי במתקנים תעשייתיים

איל צדוק

המעבדה הישראלית לבקרת חשמל סטטי

ת.ד. 108, הילה 24953, טל: 04-9572126, פקס: 04-9974585, eyalzac@netvision.net.il

כל הזכויות שמורות

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

⊕ מדוע חשוב למפעלי תעשייה להכיר את תופעת החשמל הסטטי?

⊕ מה יש בתופעה הזו שכולנו מכירים, אבל רובנו לא מבינים כיצד היא מתרחשת?

⊕ כיצד הפכה אחת התופעות השכיחות בטבע, לסיוט הגדול של התעשייה
התהליכית בעולם?

⊕ איך ניתן להקטין את ההשפעה השלילית של תופעה זו?

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

⊕ תופעת החשמל הסטטי היא תופעה פיסיקלית.

⊕ כשמתקיימת תנועה הדדית בין שני חומרים (בכל מצב צבירה), מתרחש מעבר של מטען חשמלי (אלקטרונים) מחומר אחד אל החומר השני.

⊕ המטען החשמלי נוטה להצטבר על פני הגוף הטעון (לא בתוכו) ויוצר שדה חשמלי סביב הגוף.

⊕ כאשר מתאפשר למטען החשמלי שהצטבר לנוע ממקומו למקום/גוף אחר, נוצר זרם חשמלי, והאנרגיה החשמלית של המטען הופכת בחלקה לחום שמתפזר לאורך מסלול התנועה.

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

⊕ בתעשייה, תופעת החשמל הסטטי משויכת בעיקר לקבוצה של גורמי הצתה, אשר מסוגלים לגרום להתלקחות של אוירה נפוצה, דהיינו תערובת של אויר עם חומר דלק.

⊕ המושג דלק מתייחס לחומרים דליקים בכל מצבי הצבירה: גז, אדים, אבק, סיבים.

▽ מה מייחד את התופעה הזו משאר גורמי ההצתה?

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

⊕ מאחר והתופעה מתרחשת בכל תנועה הדדית בין גופים/חומרים, ניתן לומר שאין רגע ואין מקום שהיא איננה קיימת שם !

⊕ זו תופעה פיסיקלית שאין לנו שליטה על קיומה.

⊕ התופעה נמצאת בכל פעולה ותהליך מעשה ידי אדם, כשם שהיא מתרחשת בטבע בנפרד והרחק ממגע אדם.

▽ כיצד התופעה הזו מאיימת על מפעלי התעשייה?

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

התעשייה התהליכית כוללת מפעלים במגוון רחב של תחומי יצור, ביניהם:

כימיה - דשנים, חומרי הדברה, תוספים, חומרי גלם.

פטרוכימיה - זיקוק, איחסון, שינוע ומכירה של דלקים.

תרופות - חומרי מוצא אבקתיים/נוזליים, חומרים יעילים של תרופות, יצור פארמקולוגי.

פלסטיקה - יצור, אריזה, שינוע, הזרמת פתיתים/אבקות.

מזון - איחסון, שינוע, שימוש בחומרים אבקתיים/נוזליים.

ועוד: קוסמטיקה, מיקרואלקטרוניקה, צבעים, חומרי נפץ...

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

שני מאפיינים משותפים לכל מפעלי התעשייה הללו

(1) שימוש בחומרים שיוצרים אוירה דליקה במתקני היצור.

(2) ביצוע פעולות שגורמות להצטברות חשמל סטטי בחומרים ובמכונות היצור.

לכן, כשבתהליך מסוים נוצרת אוירה דליקה ובאותו זמן מצטבר מטען חשמלי –

צפויה סכנה לפיצוץ !!

∇ כיצד אפשר לזהות סיכונים אלו באופן שיטתי ומסודר?

סיכוני חשמל סטטי בתעשייה - הקדמה

לצורך זה יש לבצע במפעל סקר סיכונים, באזור שהוגדר בעל אוירה דליקה.
המפעל יגדיר את האזור הדליק על פי הקריטריונים בת"י 60079 חלק 10.

∇ מה יכלול סקר סיכונים ומה התפוקה שלו?

מתווה לסקר "סיכוני חשמל סטטי" לפי ת"י 60079 חלק 32

מטרה

- (1) לאתר ולוודא מצבי כשל מסוכנים
- (2) להציע דרכים לניטרול הסיכונים

אבני דרך

- (1) זיהוי מתקנים ותהליכים בהם יש אפירה דליקה ומטען חשמלי.
- (2) ניתוח כמותי של הסיכונים.
- (3) זיהוי מצבי כשל שעלולים לגרום להצתה או פיצוץ.
- (4) המלצות על אמצעים לניטרול מצבי הכשל.

מתווה לסקר "סיכוני חשמל סטטי" לפי ת"י 60079 חלק 32

- 1) התקן מציג מודל להערכת סיכונים של חשמל סטטי.
- 2) התקן מציע להשתמש בשיטות וציוד למדידה של פרמטרים אלקטרוסטטיים בכדי:
 - א. לזהות קיום של סיכונים.
 - ב. להעריך באופן כמותי את סכנת ההתלקחות הצפויה מהם.
 - ג. לוודא פעילות יעילה של אמצעים שיושמו לניטרול הסיכונים.

ניתוח כמותי של סיכוני חשמל סטטי במתקנים תעשייתיים

חלק א'

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

השיטה - כלי עבודה רב-תחומי בשלוש רמות:

□ **חיזוי** סיכוני הצתת חשמל סטטי **במתקן חדש**
הנמצא בשלב התיכנון;

□ **זיהוי** מצבי סיכון הצתה **במתקן קיים**;

□ **ניתוח** שריפות ופיצוצים לגילוי **סיבת הכשל**.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

מרכיבי היישום בתעשייה התהליכית

- שלש רמות טיפול לפי סטאטוס המתקן
- בסיס מידע לכל רמת טיפול
- שלבי ביצוע ייחודיים לכל רמה
- גיבוש פתרונות טכנו-כלכליים מדוייקים

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יתרונות ועקרונות השיטה

- שילוב של ידע ומידע מדעיים יחד עם אמצעי בדיקה מעבדתיים.
- ניסיון רב שנים שהפך לתהליך טיפול מסודר בסיכוני אש ופיצוץ.
- איתור נקודות כשל פוטנציאליות וזיהוי נקודות הכשל האמיתיות.
- ניתוח וזיהוי מנגנון ההצתה בכל נקודת כשל.
- גיבוש פתרונות להסרת הסיכון על בסיס הבנת מנגנון ההצתה.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה ברמת "חיזוי במתקן חדש"

המידע הנדרש

- תוכנית קווית ותרשימי זרימה של המתקן (LAYOUT).
- מסמכי תיאור התהליך.
- מסמכי MSDS של חומרי התהליך וחומרי עזר.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה ברמת "חיזוי במתקן חדש" שלבי הביצוע

- בחינה של תכונות חומרי התהליך, מבנה ציוד היצור, כלי עבודה ועזר.
- בחינת האפשרות להיווצרות מטען אלקטרוסטטי, עפ"י פעילויות היצור.
- בחינת האפשרות להיווצרות אוירה דליקה, עפ"י ציוד היצור.
- ניתוח המצבים בהם ייתכנו בו-זמנית מטען אלקטרוסטטי ואוירה דליקה.
- ניתוח כמותי של היתכנות פריקות חשמל סטטי: אנרגיה, נתיב, סף.
- ניתוח כמותי של יכולת ההצתה בפועל: אנרגיה צפויה מול סף הרגישות.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה ברמת "חיזוי במתקן חדש"

גיבוש פתרונות

- ניתוח מנגנון התרחשות ההצתה בכל נקודת כשל מאומתת.
- זיהוי לוגי של המרכיבים הקריטיים להתרחשות הצתה.
- הצגת האפשרויות הטכניות "לשבירת" מנגנון הכשל.
- בחינת ישימות טכנו-כלכלית של כל הפתרונות.
- תיכנון הנדסי של פתרון נבחר.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה ברמת "זיהוי במתקן קיים"

המידע הנדרש

- תוכנית הביצוע של המתקן (AS MADE).
- מסמכי תיאור התהליך.
- היסטוריה של התקלות במתקן.
- תוצאות מדידות במתקן: משטר אדמות, שדה/מטען אלקטרוסטטי בציד ובחומרי התהליך, תכונות של ציוד אישי וציוד עזר.
- בדיקת המתקן לאיתור מקורות פוטנציאלים לפליטה של אוירה דליקה.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה ברמת "זיהוי במתקן קיים"

שלבי הביצוע

- בחינה של תכונות חומרי התהליך, מבנה ציוד היצור, כלי עבודה ועזר.
- זיהוי המצבים בהם ייתכנו בו-זמנית מטען אלקטרוסטטי ואוירה דליקה.
- ניתוח כמותי של היתכנות פריקות חשמל סטטי: אנרגיה, נתיב, סף.
- ניתוח כמותי של יכולת ההצתה בפועל: אנרגיה צפויה מול סף הרגישות.
- אימות נקודות כשל פוטנציאליות.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה ברמת "זיהוי במתקן קיים"

גיבוש פתרונות

- ניתוח מנגנון התרחשות ההצתה בכל נקודת כשל מאומתת.
- ביצוע סימולציה פיסיקלית להבנת ההתנהגות של מנגנון ההצתה.
- זיהוי של המרכיבים הקריטיים להתרחשות הצתה.
- הצגת האפשרויות הטכניות "לשבירת" מנגנון הכשל.
- בחינת ישימות טכנו-כלכלית של כל הפתרונות.
- תיכנון הנדסי של פתרון נבחר.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה במתקן בו התרחשו הצתה/פיצוץ המידע הנדרש

- תוכנית הביצוע של המתקן (AS MADE).
- מסמכי תיאור התהליך.
- היסטוריה של התקלות במתקן.
- מסמכי MSDS של חומרי התהליך וחומרי עזר.
- תיחקור עובדים: מהלך הפעילות לפני ובזמן האירוע.
- סיור בשטח ובחינת הממצאים.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה במתקן בו התרחשו הצתה/פיצוץ שלבי הביצוע

- בחינה של תכונות חומרי התהליך, מבנה ציוד היצור, כלי עבודה ועזר.
- בחינת האפשרות להיווצרות מטען אלקטרוסטטי, עפ"י פעילויות היצור.
- בחינת האפשרות להיווצרות אוירה דליקה, עפ"י ציוד היצור.
- זיהוי נקודות הכשל בהם ייתכנו בו-זמנית מטען אלקטרוסטטי ואוירה דליקה.
- ניתוח ממצאים לאיתור האזור בו החלו ההתלקחות/הפיצוץ.
- ניתוח ממצאים ונקודות כשל לאיתור גורמי הצתה פוטנציאליים.
- בחינת גורמי הצתה והערכת סבירותם.
- הכנת תסריט של שיחזור האירוע עפ"י הממצאים וגורם ההצתה המשוער.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

יישום השיטה במתקן בו התרחשו הצתה/פיצוץ

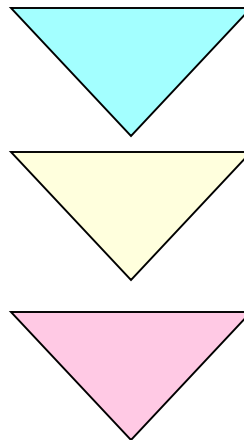
גיבוש פתרונות

- ניתוח מנגנון התרחשות ההצתה בגורם ההצתה הסביר ביותר (או בכולם).
- ביצוע סימולציה פיסיקלית לאימות ההתנהגות של מנגנון ההצתה.
- זיהוי של המרכיבים הקריטיים להתרחשות הצתה.
- הצגת האפשרויות הטכניות "לשבירת" מנגנון הכשל.
- בחינת ישימות טכנו-כלכלית של כל הפתרונות.
- תיכנון הנדסי של פתרון נבחר.

שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

סיכום שלבי השיטה באמצעות תרשימי זרימה

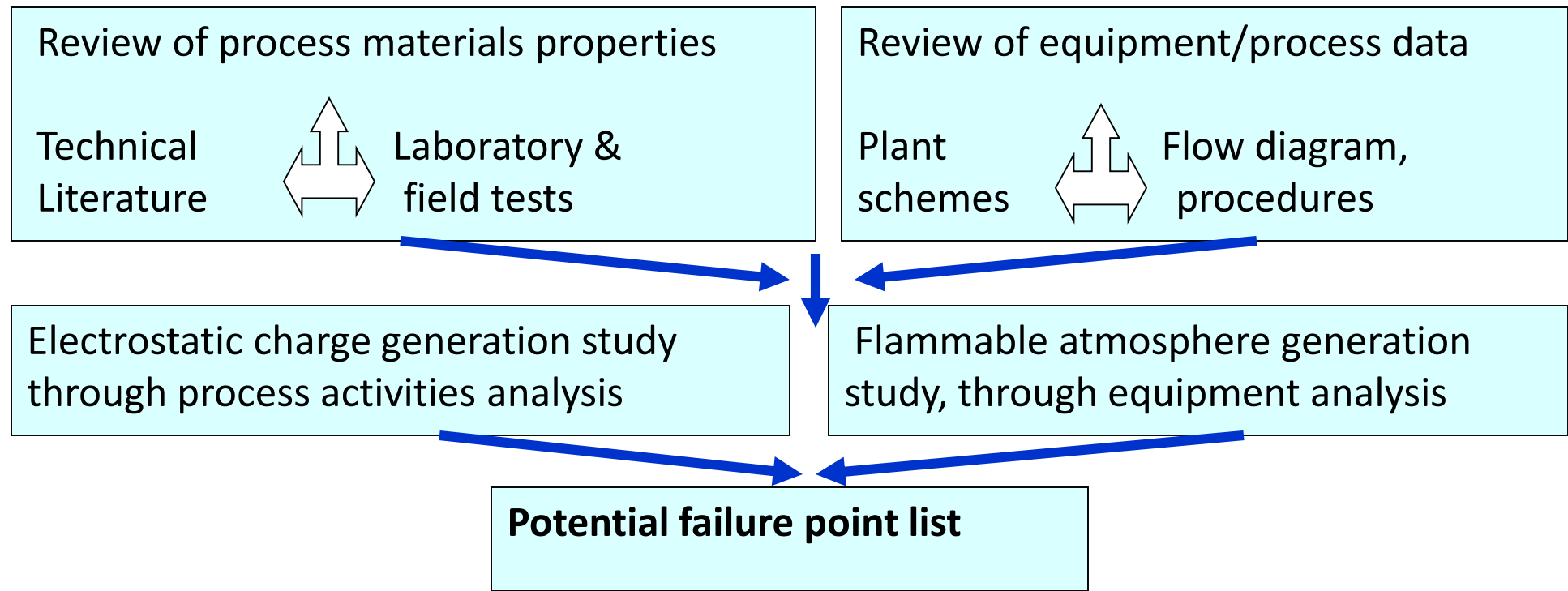


שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

• שלב ראשון – איתור וזיהוי נקודות כשל פוטנציאליות

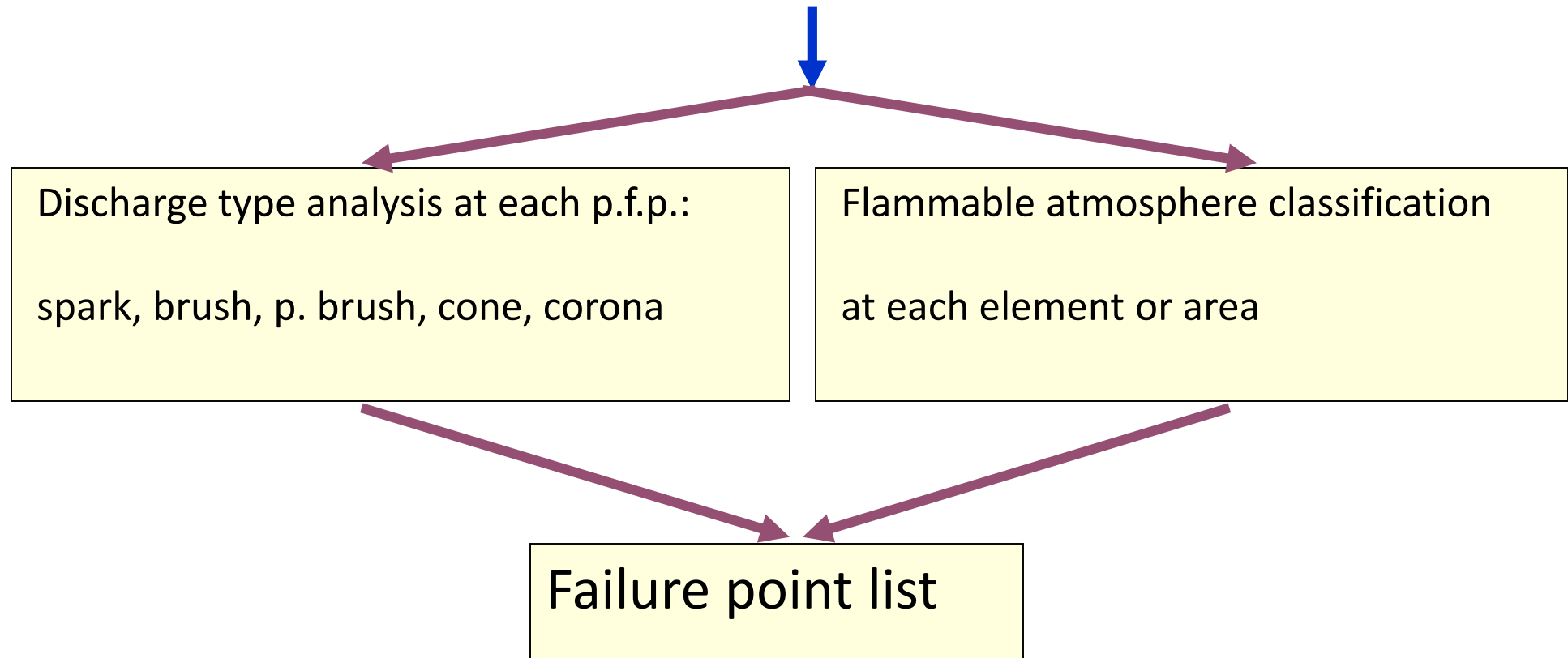
Failure Point Analysis Method
for an existing chemical plant



שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

• שלב שני – בחינה ואימות נקודות הכשל



שיטת FPA לניתוח סיכוני חשמל סטטי

FPA = Failure Point Analysis

- שלב שלישי – ניתוח כמותי של נקודות כשל ומנגנוני הצתה, הצגת פתרונות ישימים, תיכנון הנדסי של פתרון

Quantitative analysis of discharge igniteability at each failure point, using : MIE, MIC, E_{DIS} , T_{IGNI} , E_{EQUI} , etc

Failure mechanism of each point

Effective & feasible recommendations for minimizing/eliminating ignition

ניתוח כמותי של סיכוני חשמל סטטי במתקנים תעשייתיים

חלק ב'

חישובים אלקטרוסטטיים של תנאי הצתה

התייחסות ת"י 32-60079 לניתוח סיכונים כמותי

מודלים להערכת סיכוני הצתה

- התקן מציע 3 מודלים לאיבחון סיכון ההצתה בחומרים אבקתיים, המבוססים על ההתנגדות החשמלית הניפחית של החומרים.
 - התקן אינו מציע מודל לאיבחון סיכון ההצתה בנוזלים וגזים.
 - איבחון הסיכון בנוזלים וגזים הינו מורכב, ומחייב בחינה משולבת של תכונות החומרים, מבנה הצידוד התהליכי, שיטות העבודה, תנאים פיסיקליים בתהליך, ומדידות פרמטרים אלקטרוסטטיים.
- לכן, ניתוח סיכונים יבוצע בידי מומחה בעל ניסיון.

התייחסות ת"י 32-60079 לניתוח סיכונים כמותי

מדידות לצורך הערכת סיכוני הצתה

- מדידות של פרמטרים חשמליים – התנגדות, התנגדות סגולית, זרם, קיבול, השראות, חוזק דיאלקטרי.
 - מדידות של פרמטרים אלקטרוסטטיים – מטען וצפיפות מטען חשמלי, פוטנציאל ושדה חשמלי, יכולת טעינה, דעיכת מטען, יחס מטען/מסה.
 - מדידות של פרמטרים פיסיקליים – אנרגיית הצתה מינימלית, תחום דליקות של אבק/אדים/גז, מקדם דיאלקטרי.
- מדידות אלו תשמשנה לניתוח סיכון ההצתה באבקות ונוזלים.

חישובים אלקטרוסטטיים של תנאי הצתה בחומרים אבקתיים

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

איפיון כמותי של הגורמים המגבירים סיכון הצתה

- התנגדות חשמלית של האבקה - מעל $10^{10} \Omega m$.
- גודל החציון של חלקיקי אבקה - מעל 0.1 mm.
- קצב העברת חומר בצנרת – מעל
2,000 kg/h לאבקה בעלת גודל גרגרים בתחום 1 – 2 mm.
20,000 kg/h לאבקה בעלת גודל גרגרים בסביבות 0.8 mm.
- צפיפות מטען אלקטרוסטטי באבקה - מעל $0.1 \mu C/kg$.
- קוטר מיכל האיחסון (סילו) - מעל 0.5 m.

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

בדיקות להפקת המידע הנדרש לניתוח סיכון ההצתה

- התנגדות חשמלית של האבקה - בדיקת מעבדה לפי BS5958.
- גודל החציון של חלקיקי אבקה – בדיקת מעבדה בשיטה יבשה או רטובה (לפי תכונות מסיסות של החומר).
- קצב העברת חומר בצנרת – מדידה ישירה במתקן לפי סוג השינוע: פאזה דלילה (יחס אויר/אבקה של 3-9) או פאזה צפופה (יחס אויר/אבקה של 10-60).
- צפיפות מטען אלקטרוסטטי באבקה – חישוב מתמטי לפי קצב העברת החומר ומהירות השינוע (מותאמת לסוג השינוע).

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

חישובים אלקטרוסטטיים וניתוח סיכון ההצתה בשינוע פניאומטי

מהות הסיכון: התלקחות תרחיף קמח בתוך צנרת שינוע פניאומטי.

נתונים טכניים:

סוג החומר: קמח לבן,

קוטר צנרת לשינוע הקמח – 3",

ספיקת הקמח אל הסילו - 2.21 Kg/Sec,

ספיקת מפוח האויר - 650 m³/h (0.18 m³/Sec),

צפיפות הקמח - 500 Kg/m³,

צפיפות הקמח באויר במהלך השינוע: $P = 2.21 / 0.18 = 12.27 \text{ Kg/m}^3$

קצב שינוע נפחי מחושב: $V = 2.21 / 500 = 4.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Sec}$

שטח חתך צנרת 3": $S = \pi (3 \times 0.0254)^2 / 4 = 4.56 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

מהירות זרימת הקמח בצנרת 3": $U = V / S = 0.9697 \approx 0.97 \text{ m/Sec}$

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

חישובים אלקטרוסטטיים וניתוח סיכון ההצתה בשינוע פניאומטי

לפי צפיפות הקמח באויר, השינוע הוא Dense Phase וניתן להניח שהאויר נע בצנרת באותה המהירות בה נע הקמח (הקמח לא נסחף אלא נדחף), כלומר $0.97 \text{ m/Sec} = v$ עבור האויר בצנרת.

לפיכך, הצפיפות הנפחית המחושבת של המטען האלקטרוסטטי בקמח בזמן שינוע בתוך הצנרת תהיה:

$$S = 10.4 \times 12.27^{0.73} \times 0.97^{1.15} = 62.56 \text{ } \mu\text{c/m}^3$$

הצפיפות המשקלית המחושבת של המטען האלקטרוסטטי תהיה:
 $S / P = 62.56 / 12.27 = 5.10 \text{ } \mu\text{c /Kg}$

מסקנה:

צפיפות המטען שהתקבלה בחישוב **גדולה מערך הסף** של $1 \mu\text{c /Kg}$, ולכן היא מגדילה ההסתברות להתרחשות הצתה.

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

חישובים אלקטרוסטטיים וניתוח סיכון ההצתה בשינוע פניאומטי

בכדי לקבוע אם קיים סיכון הצתה יש להשוות את ריכוז אבק הקמח בצנרת בעת השינוע הפניאומטי עם תחום הדליקות של תרחיף קמח.

מאחר ואין נתון מדויק לתחום הדליקות של אבק קמח, ניתן להיעזר בתחום הדליקות הכללי של אבקות אורגניות, דהיינו מ- 60 gr עד ל- 6 Kg.

היות וצפיפות הקמח בתוך הצנרת היא 12.27 Kg/m^3 מתקבל שהצפיפות בפועל גבוהה פי 2 ביחס לגבול הריכוז העליון.

מסקנה:

ניתן לקבוע שבתוך צנרת השינוע לא צפויה להתקיים אוירה דליקה של קמח, ולכן לא צפויה להתרחש הצתה.

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

חישובים אלקטרוסטטיים וניתוח סיכון ההצתה במילוי של סילו

מהות הסיכון: התלקחות תרחיפי אבק בתוך הסילו.

נתונים טכניים:

החומרים המטופלים - PE ו-PP

ממדי הסילו - איחסון PE: $2\phi \times 6 \text{ m}$, איחסון PP: $3\phi \times 6 \text{ m}$,

התנגדות חשמלית של מוצר אבקתי מבוסס PE – $R = 0.432 \times 10^{12} \Omega \text{m}$,

התנגדות חשמלית של חומר גלם PP טחון – $R > 0.39 \times 10^{15} \Omega \text{m}$,

חציון של החומר – מוצר מבוסס PE: $294 \mu\text{m}$, חומר גלם PP: $456 \mu\text{m}$,

אנרגיית הצתה המינימלית – PE: 30 mJ , PP: 15 mJ ,

שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

חישובים אלקטרוסטטיים וניתוח סיכון ההצתה במילוי של סילו

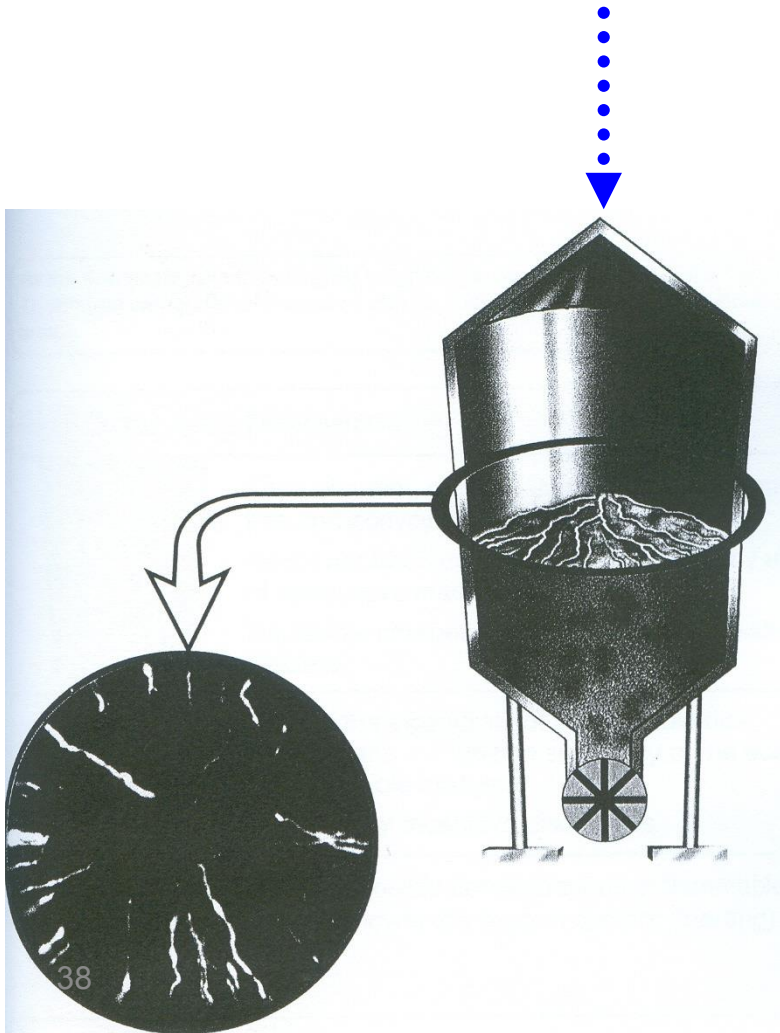
גורם ההצתה: פריקה קונית (Cone Discharge).

המקור: חלקיקי אבקה, בעלת התנגדות חשמלית מעל $10^9 \Omega m$, אשר נשפכים לתוך מכל/סילו, ומצטברים בתוכו בצורת חרוט.

כמות האנרגיה: עד $1000 mJ$.

אופי הפריקה: פריקה דמוית מברשת, רדיאלית, ממרכז החרוט אל דפנות המכל המוליכות.

יכולת ההצתה: תרחיפים של חלקיקי אבקה, סיבים, אדים, גזים.



שינוע פניאומטי של אבקות ומילוי מכלי סילו

חישובים אלקטרוסטטיים וניתוח סיכון ההצתה במילוי של סילו

הערכת הגבול העליון של אנרגיה שוות-ערך של הפריקה הקונית, אשר צפויה להתרחש בעת שפיכת החומר לתוך הסילו, נתונה ע"י משוואה שפותחה ע"י Glor לפי קוטר הסילו וקוטר החציון של החומר:

$$W_{Ae} = 5.22 D^{3.36} d^{1.462}$$

(1) אנרגיה שוות-ערך מחושבת של מוצר מבוסס PE: 8.99 mJ,

(2) אנרגיה שוות-ערך מחושבת של חומר גלם PP טחון: 66.40 mJ,

מסקנות לגבי סיכון ההצתה:

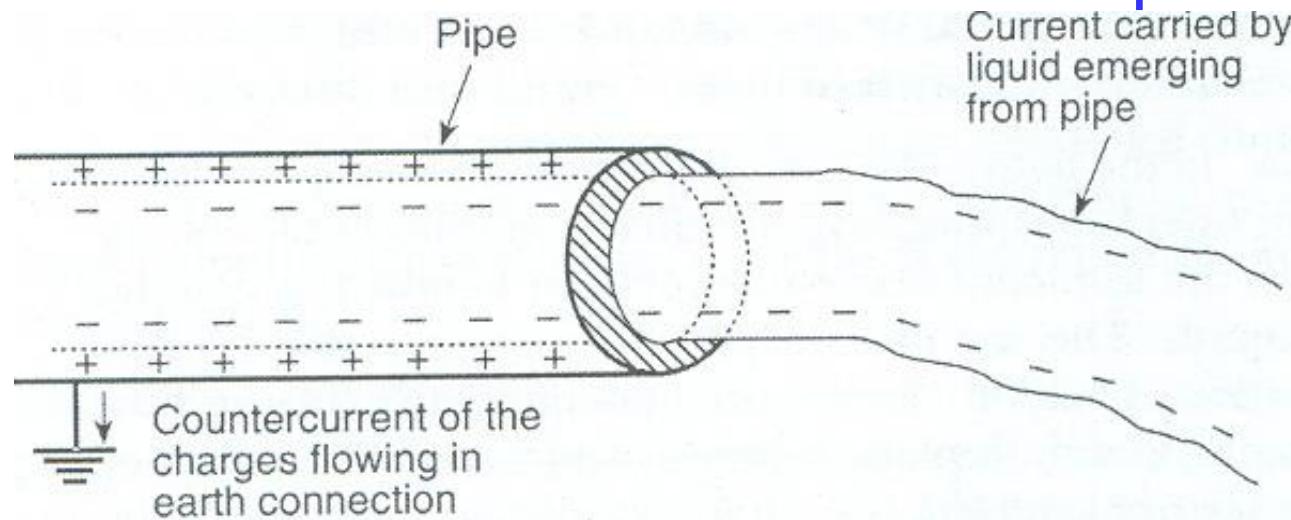
(1) אנרגיית הפריקה הצפויה במילוי PE קטנה מאנרגיית ההצתה המינימלית, ולכן לא צפויה הצתה בתהליך מילוי הסילו.

(2) אנרגיית הפריקה הצפויה במילוי PP גדולה מאנרגיית ההצתה המינימלית, ולכן קיים סיכון הצתה בתהליך מילוי הסילו.

חישובים אלקטרוסטטיים של תנאי הצתה בנוזלים

היווצרות מטען אלקטרוסטטי בהזרמה בצנרת

זרימת הנוזל בצנרת יוצרת חיכוך בין דפנות הצינור לבין שכבת הנוזל שנעה על פניה. החיכוך גורם להצטברות מטען חשמלי על הדפנות, ומטען בעל קיטוב הפוך בנוזל. המטען בנוזל מתקדם בכיוון הזרימה ונקרא זרם הטעינה.



זרם הטעינה I_p ניתן לחישוב מתמטי לפי פרמטרים המאפיינים את הזרימה.

היווצרות מטען אלקטרוסטטי בהזרמה בצנרת

זרם הטעינה I_p שנוצר בצנרת מחושב לפי מהירות הזרימה v ,
קוטר הצנרת d , ומקדם β המאפיין את הזרימה הטורבולנטית:

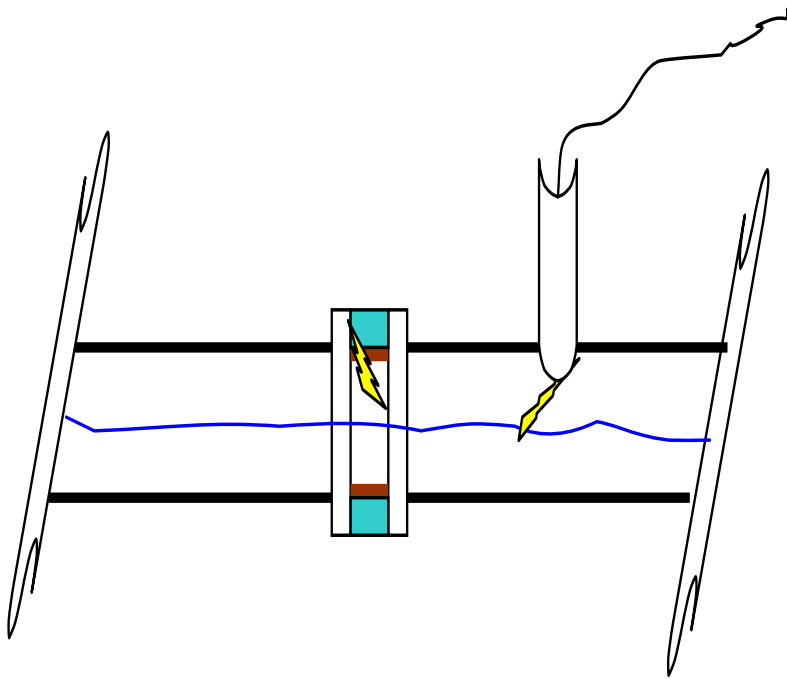
$$I_p = \beta \cdot v^x d^y$$

x, y – מעריכי חזקה חסרי ממדים, שערכם נקבע קרוב ל-2.
 β – מאפיין זרימת הנוזל, בתחום של 10^{-6} Csm^{-4} (25-3.75).

גורמי הצתת חשמל סטטי בהזרמה בצנרת

- **פריקה בתוך הצנרת**, מפני הנוזל אל אביזר מוליך כגון: מד-טמפרטורה, אטם מוליך וכו', נגרמת ע"י צפיפות המטען בנוזל. האוירה הדליקה בתוך הצנרת עלולה להתלקח.

$$\rho_p = \frac{I_P \cdot t}{C_P} \quad \frac{C}{m^3}$$



- **עוצמת הפריקה** תלויה בפוטנציאל האלקטרוסטטי של פני שטח הנוזל. בפוטנציאל נמוך, הפריקה תתרחש בתוך מרווח ניצוץ קטן מדי, מבלי שתהיה התלקחות של האוירה הדליק (quenching distance).

צפיפות המטען האלקטרוסטטי בצנרת והגורמים המשפיעים עליה

תצורת הזרימה

ערך אופייני

- זרימת נוזל בצינור מתכתי, ללא מסנן: $10 \mu\text{C}/\text{m}^3$
- זרימת נוזל בצינור עם מסנן $30-150 \mu\text{C}/\text{m}^3$: $100 \mu\text{C}/\text{m}^3$
- זרימת נוזל בצינור עם מסנן $30 \mu\text{C}/\text{m}^3 <$:
- בנוזלים לא-צמיגים (כגון קרוסין) $\Leftarrow 2000-3000 \mu\text{C}/\text{m}^3$
- בנוזלים צמיגים בלתי-מוליכים $\Leftarrow \sim 5000 \mu\text{C}/\text{m}^3$

סף הסיכון: $30 \mu\text{C}/\text{m}^3$, סף הבטיחות המומלץ: $2.65 \mu\text{C}/\text{m}^3$

הצטברות מטען אלקטרוסטטי במילוי מכלים

המטען האלקטרוסטטי הנוצר בנוזל ע"י הזרימה בצנרת, מגיע עם הנוזל לתוך המכל. הצטברות המטען במכל תלויה במוליכות החשמלית של הנוזל, בחומרי המבנה ובתנאי הארקה של המכל.

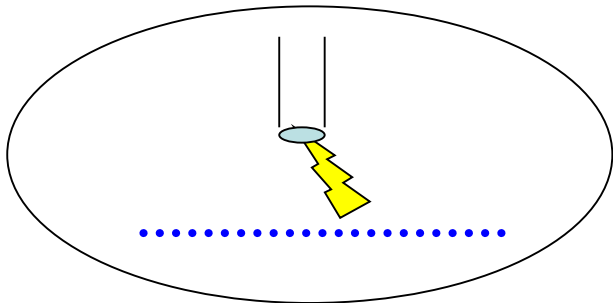
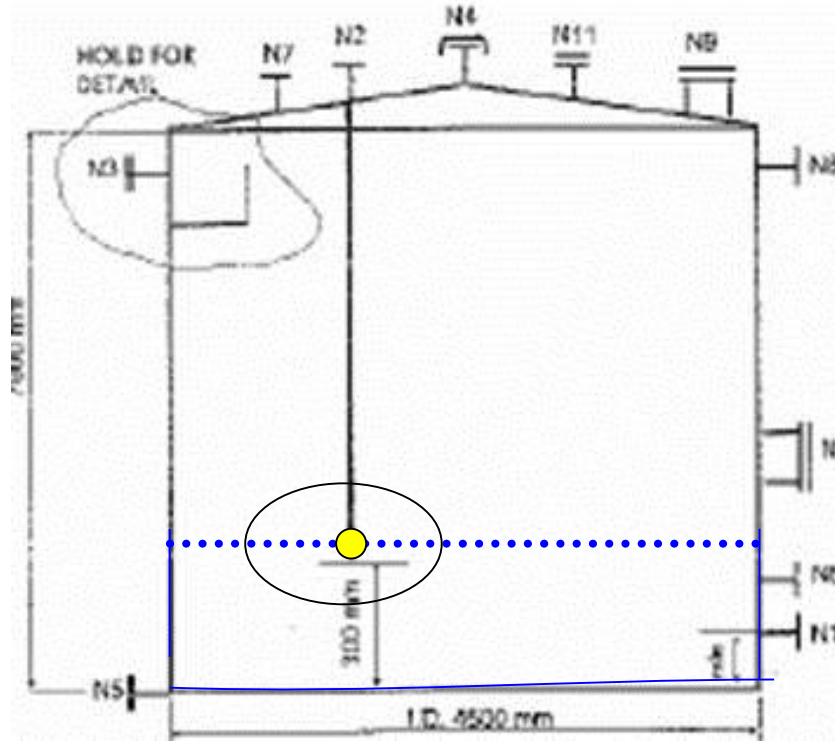
- צפיפות המטען בנוזל מבדד :
החישוב מבוסס על $\mu =$ מוביליות.

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \mu \rho_0 \frac{t_{D.P.}}{\varepsilon}} \quad C/m^3$$

- צפיפות המטען בנוזל מוליך :
החישוב מבוסס על קצב הצטברות לעומת קצב זליגה להארקה.

$$\rho_t = \rho_p \frac{\tau}{t_{D.P.}} \left(1 - e^{-\frac{t_{D.P.}}{\tau}} \right) \quad C/m^3$$

גורמי הצתה בהזרמה ומילוי מכלים



- יכולת ההצתה של הפריקה מפני הנוזל אל אביזר מוליך, תלויה בפוטנציאל האלקטרוסטטי הנוצר ע"י צפיפות המטען בנוזל:
 $\theta \leq 25 \text{ kV}$

- הפוטנציאל האלקטרוסטטי הנוצר על פני הנוזל, מחושב לפי קוטר המכל וצפיפות המטען בנוזל. עבור מכל צר וגבוה מאוד:

$$\phi_{SURF} = (1/16) \rho_t d^2 / [\epsilon_0 (1 + \epsilon_l)] \text{ Volt}$$

הערכים הקריטיים של גורמי הצתה

חישוב לדוגמא: סיכון התלקחות של נוזל מוליך במכל

נתונים: נפח כללי 959 m^3 , נפח עד 85.9 m^3 d.p., זמן מילוי 200 sec ,
קוטר הצינור 0.8 m , מהירות זרימה 0.8 m/s ,
מוליכות הנוזל 90 pS/m , מק. דיאלקטרי $\epsilon = 2$,

חישוב פוטנציאל פני השטח של הנוזל בהתחשב בדעיכת המטען בזמן המילוי:

$$\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2}{90 \cdot 10^{-12}} = 0.196 \text{ sec} \quad I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8^2 \cdot 0.8^2 = 1.536 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{600}}{c_{600}} = \frac{1.536 \cdot 10^{-6} \cdot 200}{85.9} = 3.576 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^3$$

$$\rho_t = \rho_p \frac{\tau}{t_{600}} \left(1 - e^{-\frac{t_{600}}{\tau}} \right) = 3.576 \cdot 10^{-6} \frac{0.196}{200} \left(1 - e^{-\frac{200}{0.196}} \right) = 0.00368 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 0.00368 = 0.019 \text{ kV}$$

הערכים הקריטיים של גורמי הצתה

חישוב לדוגמא: סיכון התלקחות של נוזל מבדד במכל

נתונים: נפח כללי 110 m^3 , נפח עד 4.8 m^3 d.p., זמן מילוי 687 sec ,
קוטר הצינור 0.1 m , מהירות זרימה 0.8 m/s ,
מוליכות נוזל 0.1 pS/m , מק. דיאלקטרי $\epsilon = 2.1$,

חישוב פוטנציאל פני השטח של הנוזל כאשר המטען אינו דועך בזמן המילוי:

$$\tau_{theor} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1}{0.1 \cdot 10^{-12}} = 185.85\text{ sec}$$

$$I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8^2 \cdot 0.1^2 = 0.024 \cdot 10^{-6}\text{ A}$$

הזרם החשמלי שנוצר בנוזל המבדד
קטן פי 64 מהזרם בנוזל המוליך,

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{300}}{C_{300}} = \frac{0.024 \cdot 10^{-6} \cdot 687}{4.8} = 3.435 \cdot 10^{-6}\text{ C/m}^3$$

ולמרות זאת הפוטנציאל החשמלי

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 3.435 = 18.24\text{ kV}$$

על הנוזל גדול פי 1000 !

הערכים הקריטיים של גורמי הצתה

חישוב לדוגמא: השפעת מהירות זרימה במילוי נוזל מבדד במכל

נתונים: נפח כללי 110m^3 , נפח עד 4.8 m^3 d.p., זמן מילוי 510 sec (-25%),
קוטר הצינור 0.1m , **מהירות זרימה** 1.2m/s ,
מוליכות נוזל 0.1 pS/m , מק. דיאלקטרי $\epsilon = 2.1$,

חישוב פוטנציאל פני השטח של הנוזל כאשר המטען אינו דועך בזמן המילוי:

$$\tau_{theor} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1}{0.1 \cdot 10^{-12}} = 185.85\text{ sec}$$

$$I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 1.2^2 \cdot 0.1^2 = 0.054 \cdot 10^{-6}\text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{300}}{c_{300}} = \frac{0.054 \cdot 10^{-6} \cdot 510}{4.8} = 5.732 \cdot 10^{-6}\text{ C/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 5.732 = 30.43\text{ kV} \square 25\text{ kV}$$

ניתוח כמותי של סיכוני חשמל סטטי במתקנים תעשייתיים

סיכום

- (1) הפרמטרים הפיסיקליים המשפיעים על סיכון ההתלקחות שייכים למבנה הציוד התהליכי, תכונות החומרים, שיטות העבודה.
- (2) אבק של חומרים "רגילים" רבים עלול ליצור אוירה דליקה, ולכן הוא מהווה סיכון שמחייב בדיקת תכונותיו ואופן הטיפול בו, באמצעות סקר סיכונים.
- (3) בהזרמת נוזלים לא ניתן להחיל "הנחיה כללית", אשר תבטיח מניעת התלקחות בכל סוגי הצינורות והמכלים.
- (4) סיכוני התלקחות מחשמל סטטי ניתנים לחישוב ולהערכה באופן כמותי, באמצעות ניתוח פיסיקלי-מתמטי.
- (5) במתקן שנדרש בו סקר, יש לבצעו באמצעות בדיקה פרטנית ולא על פי מידע מהאינטרנט.