

פרק שני

סיכוני פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה הכימית

הסיכון העיקרי מפריקה אלקטרוסטטית בתעשייה הכימית הוא הצתת אדי כימיקלים נדיפים, גזים דליקים ואבקות אורגניות מעורבות באוויר. תערובות דליקות עלולות להימצא באזורי האחסנה והייצור בשטח המפעל. פריקה אלקטרוסטטית מהווה רק אחד ממקורות ההצתה האפשריים של תערובות דליקות. בניתוח הסיכונים במפעל כימי יש צורך להתחשב בכל מקורות ההצתה האפשריים. לדוגמה: ניצוץ מצויד חשמלי הנמצא ליד מיתקנים הפולטים חומר מסוכן. מקורות הצתה אפשריים כוללים: פריקה אלקטרוסטטית; פגיעת ברק; ניצוץ עקב נתז מכני של גוף קשה; מישטח חס; חיכוך מכני היוצר חום רב; ניצוץ חשמלי ממכשירי חשמל, כלי חשמל וגופי תאורה; ריתוך; עישון וקרינה אלקטרומגנטית. במפעלים כימיים אופייניים מצויים אזורי ייצור, שירותים ומחסנים, שניתן לסווגם בהתאם לסכנת היווצרות אווירה נפיצה/דליקה:

אזור הייצור: מוגדר כאזור בעל רמת סיכון גבוהה. כל פריטי הצויד החשמלי המותקן בו - כולל גופי תאורה, מפסקים, ארונות ושקעים - חייבים להיות מוגני פיצוץ (Ex - Explosion Proof). הפעילות מתבצעת במבנים פתוחים כדי למנוע אווירה דליקה ופיצוץ. קיימים מחסומי אש כדי למנוע התפשטות דליקה.

אזור שירותים (גימור): מצוי בקומות התחתונות של מבנה הייצור או במבנה נפרד. מתבצעות בו עבודות ייבוש, שינוע ואריזה של המוצרים המוגמרים, וכיו"ב. רמת הסיכון גבוהה עד בינונית. בעיית הבטיחות העיקרית באזור הגימור היא השימוש בחומרי עזר צוברי חשמל סטטי, והימצאות המיתקנים באזור זה במבנה סגור. התפתחות אש בחומר מסוכן בתוך מבנה סגור עלולה להתגלגל לפיצוץ שיחריב את המבנה.

אזור מחסנים ובתי מלאכה: מחסנים לחומרי גלם ומוצרים מוגמרים, מחסנים כלליים ומחלקות סיוע הנדסי, כגון: מסגרייה, חשמלייה וכד'. הסיכון - בינוני עד נמוך.

רקע להיווצרות ולטעינה אלקטרוסטטית בחומרים כימיים

נוזל נטען במיטענים אלקטרוסטטיים בעת זרימתו דרך צנרת; מעבר דרך מסננים מיקרוניים; חיכוך בין נוזלים שאינם מתערבבים; נפילה חופשית לתוך מיכל; התגבשות והמסה של מוצקים ועוד. נוזל בעל התנגדות נפחית סגולית גבוהה מ- 10^8 אוהם - עשוי להיטען במידה משמעותית, עד לסכנת פריקה אלקטרוסטטית בעוצמה גבוהה.

הסכנה להיווצרות מיטענים ולצבירתם גדלה ככל שהתנגדותו החשמלית של הנוזל גבוהה יותר. זמן הדעיכה (הפיזור) של מיטענים סטטיים בחומר מבודד מתארך מאוד, והמיטען הסטטי המצטבר נפרק רק כעבור ימים ושבועות. להלן רשימה חלקית של כימיקלים דליקים, חומרי גלם ומוצרים, בעלי התנגדויות חשמליות שונות, בשימוש בתעשיות הכימיות:

ההתנגדות הנפחית נתונה ביחידות של אוהם-מטר ($\Omega \cdot m$)

Carbon disulfide:	10^{16}
Carbon tetrachloride:	10^{15}
Diesel oils:	10^{13}
Gasoline, white spirit:	10^{13}
Benzene, toluene, xylene:	10^{13}
Mesitylene:	10^{13}
Diethyl ether:	10^{13}
1,4-dioxane:	10^{12}
Anisole:	10^{11}
Stearic acid dibutyl ester:	10^{10}
Sebacic acid dibutyl ester:	10^8
Chloroform, chlorobenzene, bromobenzene, mono bromobenzene:	10^8
Dichloromethane:	10^8
Propionic acid:	10^8

כימיקלים מוליכי חשמל:

1,2-dichloroethane:	10^7
Benzoic acid ethyl ester:	10^7
Butanodil, methanol, ethanol, triethyl amine:	10^6
N-propanol, n-butanol:	10^6
Acetic acid ethyl ester:	10^6
Cis-1,2-dichloroethylene :	10^5
Acetic acid, ethyl acetate, acetonitrile, propionitrile :	10^5
Pyridine, benzonitrile:	10^5
Acetone, butanone, cyclohexanone:	10^5
Isobutanol:	10^5
Isopropanol, tert butanol:	10^4
Formic acid ethyl ester:	10^4
Anhydrous acetic acid:	10^4
Propionaldehyde:	10^4
Nitrobenzene:	10^4
Isobutyric anhydride, isobutyric acid, tripropyl amine:	$< 10^4$
Glycol, glycolmonoethyle:	10^3
Ether:	10^3
Dimethyl formamide:	10^3
Acetaldehyde :	10^3
Formic acid :	10^2

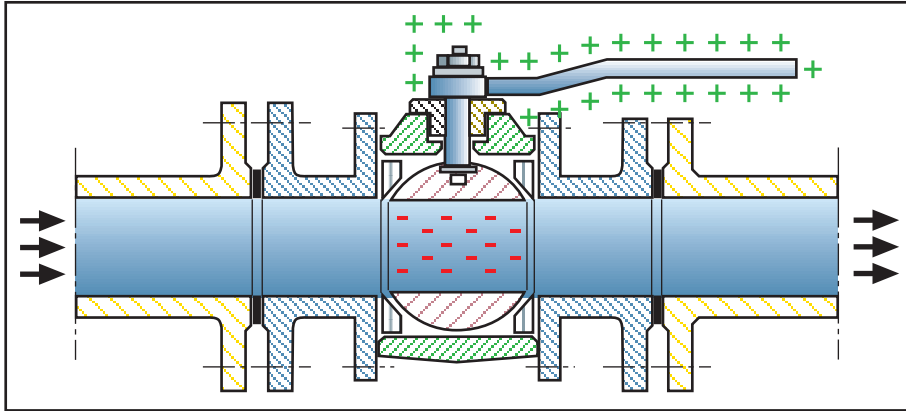
ניתן לשפר את מוליכות הנוזל (להקטין את התנגדותו החשמלית) באמצעות תוספים של כימיקלים אנטיסטטיים מיוחדים, המתערבבים היטב בנוזל העיקרי. מים, לדוגמה, יכולים לשפר מוליכות של נוזלים אך הם אינם מתערבבים בממסים אורגניים.

נוזל לא הומוגני המכיל רכיבים שאינם מתערבבים (כגון מים ונפט) או נוזל המכיל חלקיקים מוצקים ומוצקים מסיסים, עלולים להיטען במיטענים אלקטרוסטטיים בקלות רבה.

ריאקציה, הכוללת תהליך התגבשות (Crystallization) בנוזל עם בידוד חשמלי גבוה, עלולה לגרום להיווצרות מקומית מוגברת של מיטענים אלקטרוסטטיים. כאשר תהליך ההתגבשות נעשה בנוזל דליק בלתי מוליך, חייבים לבצעו בנוכחות גז אדיש, כגון חנקן.

דוגמאות לסכנות ודרכי מניעתן

נוזלים נטענים במיטען א"ס בחיכוך בצינור; בעירבול; בהתנגשות בדפנות מוצקות או בפני נוזל אחר; בתהליך התזה (תוך הפיכתם לתרסיס ואדים) ובמעבר דרך מסננים מיקרוניים (חרירים קטנים מ-10 מיקרון). חלקי מתכת מבודדים עשויים להיטען כאשר עוברים דרכם נוזלים שונים, לדוגמה: טעינה אלקטרוסטטית של חלקי צנרת מבודדת או טעינה א"ס בידית מבודדת של שסתום כדורי. (ראו איור מס' 19).



איור 19: היווצרות מיטענים אלקטרוסטיים בידית מבודדת של שסתום כדורי, העשויה מתכת מצופה בשיכבת טפולון

הגורמים העיקריים המשפיעים על טעינה אלקטרוסטטית של נוזלים:

- ההתנגדות החשמלית הסגולית (ההתנגדות הנפחית) של הנוזל.
- מהירות הזרימה של הנוזל בצנרת.
- סוג החומרים שמהם עשויה הצנרת.
- אורך הצנרת.
- מערבולות במהלך הזרימה.
- קיומם של מוצקים מרחפים בתוך הנוזל.
- קיומם של 2 נוזלים בלתי מסיסים.

האמצעים להגבלת אווירה נפיצה הנוצרת על-ידי אדים דליקים:

- הצנרת חייבת להיות מלאה בנוזל במלוא נפחה.
- הזנת מיכלים או ריקונם תתבצע על-ידי טובלן (צינור, Deep pipe) המגיע עד קרקעית המיכל, או על-ידי הזנה וריקון בתחתית המיכל.
- יש לתכנן את התפשטות האדים הדליקים לנפח מיזערי ככל האפשר. לדוגמה: על-ידי שאיבה מקומית של אדים הנפלטים מפתח ריאקטור.

האמצעים להפחתת טעינה אלקטרוסטטית

ולמניעת פריקה אלקטרוסטטית:

- הארקת כל המערכת המתכתית שבה עוברים הנוזלים, כולל מיכלים וצנרת.
- קישור על-ידי מוליך חשמלי (גישור) של חלקי מתכת "צפים" חשמלית.
- שמירה על ניקיון (טוהר) הנוזל. ככל שהנוזל טהור יותר - כך הוא נטען פחות. (חלקיקי מוצקים ומים בנוזל הם נשאנים פוטנציאליים של מיטען אלקטרוסטטי).
- הגבלת מהירות הזרימה של הנוזל בצנרת. רצוי לתכנן צנרת למהירות זרימה שאיננה עולה על 10 מטר בשנייה.
- יש למנוע היווצרות מערבולות והתזה של הנוזל לתוך חלל המיכל.

- שימוש בתוספים מוליכי חשמל, כאשר זה אפשרי, לצורך הקטנת ההתנגדות החשמלית של הנוזלים.
 - כאשר נעשה שימוש ברכיבי צנרת ושסתומים מבודדים חשמלית, כגון רכיבים עם ציפוי זכוכית, יש להבטיח את שלמות הציפוי. יש לגשר בין חלקי צנרת עם הברגות מצופות בסרט טפלון באמצעות מגשר פתיל מוליך.
 - אם נדרש להשתמש במסנן מיקרוני, יש צורך באמצעים מיוחדים לניטרול המיטען האלקטרוסטטי.
- דוגמאות לאמצעים מעשיים למניעת צבירה ופריקה אלקטרוסטטית הוצגו במבוא.

מנגנון הכשל של פיצוץ או הצתה של אדי כימיקלים (לאו דווקא פריקה אלקטרוסטטית) כולל מספר רכיבים:

- א. ריכוז תערובת אדים ואוויר בתחום הנפיצות/הדליקות. דליקות של נוזלים תלויה בנקודת ההבזק של אדי הנוזל (הטמפרטורה הנמוכה ביותר של הנוזל, בה נוצרים אדים דליקים), בטמפרטורה וביחס בין האדים לאוויר (Explosive Limit). פריקה אלקטרוסטטית באווירה דלילה מדי או רוויה מדי לא תגרום להצתה/פיצוץ.
- ב. מקור אנרגיה להצתת התערובת. האם האנרגיה של מקור ההצתה שווה או גדולה יותר מהאנרגיה המינימלית הדרושה להצתת תערובת אדים ואוויר של אותו חומר? נוזלים דליקים ניתן לדרג על-פי "סיכון רב" עד "סיכון מועט". לדוגמה, רשימת כימיקלים, בסדר סיכון יורד (אינם מהווים רשימה מלאה של חומרי גלם ומוצרים דליקים):

Carbon Disulfide; Hydrogen; Acetylene; Benzene; Ethylene; Methanol; Acetone; Hydrocarbons; Red Phosphorus; Sulfur; Alcohols.

במקומות סגורים - צנרת; מיכליות שינוע; ריאקטורים; מיכלים לאחסנת כימיקלים; שפכי כימיקלים וכיו"ב - סכנת הפיצוץ גדלה.

"משולש הכשל" האלקטרוסטטי: מנגנון הכשל כתוצאה מפריקה אלקטרוסטטית

- מצריך קיום סימולטני (בו זמני) של 3 המרכיבים הבאים:
- א. **נשאן (Carrier)** של מיטען אלקטרוסטטי. גוף מוליך בעל קיבול חשמלי עצמי משמעותי או מבודד שאינו מוצק (נוזל, אבק, גרגרים, אדים, אירוסול וגז). ייתכנו 23 סוגי נשאנים:

- גוף העובד.
- כימיקלים או אבקות מבודדים חשמלית.
- חלקי מתכת בלתי מוארקים, כגון אוגן "צף" על צינור זכוכית.
- ב. **קולטן (Receptor)** של מיטען אלקטרוסטטי. גוף מוליך "צף" בעל קיבול עצמי משמעותי או גוף מוליך מוארק כל מכל אחסון או מיתקן ייצור, המקושר במוליך חשמלי ומוארק - עשוי להיות קולטן.
- ג. **תווך דליק או נפיץ** אשר דרכו מתפרק המיטען האלקטרוסטטי מהנשאן אל תוך הקולטן. אדי כימיקלים מכל הסוגים, במיוחד כימיקלים בעלי נקודת הבזק נמוכה, כגון Carbon Disulfide, עשויים לשמש תווך דליק.

סקר בטיחות פריקה אלקטרוסטטית במפעל כימי

- כדי לאתר מוקדי סיכון של הצתה או פיצוץ עקב פריקה אלקטרוסטטית (וכן מקורות הצתה אחרים), מומלץ לערוך סקר בטיחות אשר יכלול:
- א. סיווג המיתקנים לפי הסיכון להיווצרות אווירה נפיצה/דליקה על-פי תקני ארצות-הברית או אירופה (ראו נספח א')
 - ב. איתור מנגנון הכשל - קיום 3 הרכיבים העלולים לגרום להצתה עקב פריקה אלקטרוסטטית.
 - ג. מדידות של שדה אלקטרוסטטי ו/או כמות מיטען אלקטרוסטטי בתהליכי הייצור: במתקני הייצור, בחומרי הגלם ובחומרים המוגמרים המועברים לטיפול גימור ואחסנה.

בביצוע סקר בטיחות במפעל כימי יש לענות על השאלות הבאות, הקשורות בסיכון האלקטרוסטטי:

- האם כל המיתקנים מהווים יחידה אחת, שוות פוטנציאל, ומוארקת?
- האם קיימים תהליכי שינוע, עיבוד ואחסנה, שבהם יכול רכיב כלשהו להיות טעון במיטען אלקטרוסטטי?
- האם מנגנון הכשל האופייני של פריקה אלקטרוסטטית יכול להתקיים?
- אם התשובה לשאלה הקודמת חיובית - מהן האפשרויות לסילוק מנגנון הכשל?

נושאי הסקר

הסקר יתייחס לפרטים הבאים:
מבנה המפעל; תהליכי העבודה במיתקנים; מקורות הסיכון להצטברות מיטעני חשמל סטטי; האמצעים שנוקט המפעל להקטנת הסיכוי לתקרית הנובעת מפריקת מיטענים אלקטרוסטטיים; נוהלי העבודה והאמצעים הקיימים להקטנת הנזקים הנובעים מתקרית בטיחות, אם תתרחש.

אזור הייצור:

- סוג המבנה: רב קומות פתוח/סגור.
- תיאור רצפת המבנה: מתכת / בטון / חיפוי פלסטיק מבודד / אנטיסטטי.
- תיאור הצנרת והאוגנים על הצנרת: חומר הצנרת והאוגנים, גישור האוגנים להארקה.
- תיאור הריאקטורים ואמצעי ההגנה שלהם, כגון מערכת כיבוי אש אוטומטית ודיסקית פריצה (vent), למניעת קריסת הריאקטור במקרה של פיצוץ פנימי.
- תיאור התהליכים המבוצעים במבנה.
- הגדרת אזורי סיכון במבנה (ראו נספח). סיווג הציוד החשמלי במבנה לפי ציוד מוגן פיצוץ (EEx) ורמת ההגנה לפי IP (רמת אטימה לנוזלים ואבק), כולל: גופי תאורה; מפסקים; ארונות; שקעים; מנועים וכיו"ב.

אזור השירותים (גימור):

אזור שמתבצעות בו עבודות סיום למוצרים המוגמרים, שינוע ואריזה של המוצרים המוגמרים - תיאור המבנה באופן דומה לאזור הייצור.

אזור המחסנים:

אזור האחסנה של מוצרים בצוברים (סילו); חוות מיכלים; חביות; "שוצים" (מיכלים בינוניים); ארגזים וכד'.

חומרי גלם ומחסנים:

פירוט כל חומרי הגלם ותיאור אופן אחסנתם. קיום הפרדה פיזית בין סוגי הכימיקלים השונים וכמות אחסנה מירבית שאיננה חורגת ממיכסת האחסנה המותרת.

אחסנת ביניים:

מחוץ למבנה הייצור או בתוכו. אחסנת כמויות מוגבלות של חומר גלם על-פי הצריכה היומית השוטפת.

מערך ההארקה הסטטית:

תיאור מערכת הארקה החשמל (רצוי באמצעות שרטוט) והארקת מיתקני הייצור. דוגמה לתיאור מערכת הארקה: בכל אחת מקומות המבנה פרוסות לולאות הארקה אופקיות לאורך קירות המבנה. בחדר החשמל מצוי פס השוואת פוטנציאל המנקז אליו את כל שלוחות ההארקה האלקטרוסטטית.

בקרה:

במפעלים כימיים מצוי בדרך כלל חדר בקרה השולט על תהליכי הייצור. בחדר הבקרה מתקבלים נתונים מגששים שונים המותקנים בריאקטורים ובשאר מיתקני הייצור והאחסנה, כגון גשש טמפרטורה וגשש זרם זליגה (זרם ה"בורח" לנתיב לא מתוכנן) בריאקטורים. הגשש האחרון, P-Probe, בודק את שלמות הציפוי הפנימי המבודד. הוא מאתר פגמים באמצעות חישה זליגת זרם חשמלי מתוך פנים הריאקטור אל הדופן החיצונית. גשש הזליגה טבול בתוך ריאקטורים המצופים בציפוי מבודד פנימי - זכוכית או טפולן - ומדווח בזמן אמיתי על פריצת הציפוי המבודד. אם תוך כדי ביצוע ריאקציה כימית מתגלה זליגה בלתי קבילה, יש צורך לסיים את התהליך (לא ניתן להפסיק ריאקציה לפני סיומה). עם סיום התהליך יש להשבית את הריאקטור ולתקן את הפגם בציפוי המבודד. פגם בציפוי המבודד עלול להפוך את הריאקטור ל"קולטן" פריקה אלקטרוסטטית, ובכך יתאפשר קיומו של מנגנון הכשל של פריקה אלקטרוסטטית.

פריקה אלקטרוסטטית בנוזלים, במילוי מיכלים או ריאקטורים

תהליך מילוי הנוזלים בחביות, ריאקטורים ומיכלים אחרים, העשויים מחומרים בלתי מוליכים, עלול ליצור מיטענים סטטיים ניכרים (גם בנוזלים מוליכים). כמו כן, עלולה להיווצר אווירה נפיצה עקב אדים ורסס (אירוסול) הנוצרים בתהליך המילוי. בריאקטורים מצופים בזכוכית או בטפולן, ובמיכלים וכלי קיבול מפלסטיק, לא קיים "קולטן" למיטענים סטטיים ולכן אין סכנה מפריקה אלקטרוסטטית. אם קיים אלמנט מתכתי מוארק או "צף" במיכל או בריאקטור (מדיד גובה, לדוגמה), הוא עלול להשלים את הצלע החסרה של מנגנון הכשל. כדי למנוע סכנת פריקה אלקטרוסטטית, יש למלא מיכלים וריאקטורים על-פי הכללים הבאים:

- (1) יש להשתמש בטובלן אשר קצהו מגיע עד תחתית המיכל. השימוש בטובלן דרוש הן למילוי המיכל והן לריקונו. לחילופין, ניתן למלא/לרוקן מיכל באמצעות ברז או פתח בתחתית המיכל.
- (2) כאשר המיכל המוסר והמיכל המקבל עשויים מחומר מוליך - יש לחבר ביניהם מגשר חשמלי ולהאריק את אחד המיכלים. רצוי לחבר בין המיכלים צינור מוליך או מפזר מיטענים.
- (3) מילוי CS_2 (פחמן דו-גופריתי) נוזלי חייב להתבצע באווירה אדישה רק לאחר שטיפת המיכל בחנקן והורדת ריכוז החמצן אל מתחת ל-5%, לפני תחילת המילוי. CS_2 מאחסנים במיכל עם כיסוי שיכבת מים מעל לנוזל הדליק, למניעת היווצרות אדים מסוכנים. ההזרמה לריאקטור דרך צנרת מפלדת פחמן מגבירה את הסכנה לפיצוץ אדי CS_2 . בכל מקרה, ללא תלות בסוג החומר ממנו עשויים הצנרת והמיכלים - יש לאדש את פנים הצנרת והמיכלים, ולשנע ולעבד CS_2 במיכלים ובצנרת מתכתיים באווירה אדישה. עדיף שימוש בצנרת זכוכית ובריאקטורים מצופים בזכוכית או בטפולן, ובלבד שתהיה הקפדה על אווירה אדישה ואי-הימצאות גופים מוליכים במגע עם הנוזל ואדיו.
- (4) אצטון הוא נוזל מוליך, ולכן - מיטענים שייוצרו בו יתפזרו ביעילות בעוברם דרך צנרת מוליכה ומוארקת. הרגישות של אצטון להצתה על-ידי פריקה אלקטרוסטטית היא גבוהה. לכן מומלץ להקפיד על בקרת פריקה אלקטרוסטטית יעילה בתהליכים שבהם נעשה שימוש באצטון.

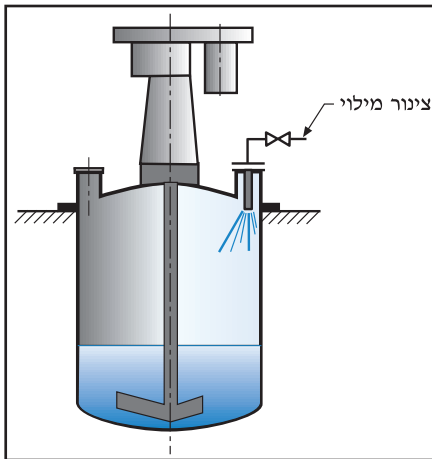
הזרמה בצנרת

חיכוך נוזלים מבודדים בדופן צינור או בינם לבין עצמם, כאשר הנוזלים אינם הומוגניים ואינם מסיסים, עלול ליצור טעינה אלקטרוסטטית משמעותית. הדבר נכון גם במעבר דרך ברזים, מסננים מיקרוניים וכל התקן היוצר מערבולות בנוזל. ניתן להקטין את היווצרות המיטען הסטטי על-ידי ויסות מהירויות השאיבה ומהירות זרימת הכימיקלים בצנורות. כללית, ניתן לומר לגבי כל הנוזלים ההומוגניים (פרט ל- CS_2) כי: במהירויות זרימה נמוכות מ-1 מטר בשנייה לא נוצרים מיטענים סטטיים משמעותיים.

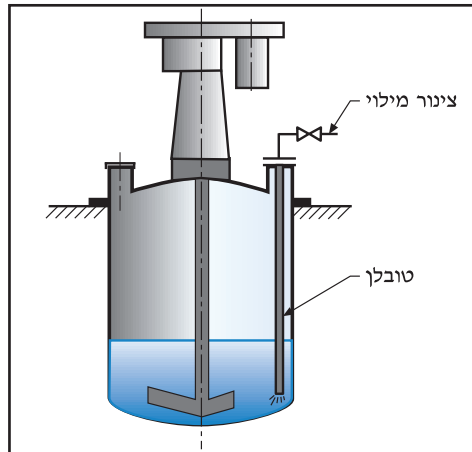
שימוש בטובלן - החדרת הכימיקלים למיכלים ולכלי קיבול אחרים ישירות לתוך תחתית המיכל - מונע נפילה חופשית של הנוזל והיווצרות אדים ורסס טעונים אלקטרוסטטית (ראו איורים מס' 20 ו-21).

צנרת זכוכית איננה מהווה "קולטן" ולכן נוזל טעון לא יתפרק אליה. נוזל מבודד הזורם דרך צנרת כזאת ייטען במיטענים סטטיים ביתר שאת. כאשר הנוזל מגיע אל קולטן - אביזר מתכתי הבא במגע עם הנוזל ואדיו - הוא עלול להביא לפריקה אלקטרוסטטית. סוג החומר שממנו עשוי הצינור יכול לסייע בניטרול המיטענים הסטטיים, כמפורט כאן:

- (א) צינור מוליך. יש לוודא שהנוזל מגיע לצינור כשהוא אינו טעון אלקטרוסטטית, ו/או לוודא שחלל הצינור מלא לחלוטין ואין בו חלל ריק לאדים או לאירוסול.
- (ב) צינור העשוי מחומר מפזר מיטענים, כגון טפלון מוליך.
- (ג) צינור בלתי מוליך, כגון זכוכית, שממנו מועבר הנוזל למיכל בלתי מוליך, או למיכל מצופה בחומר בלתי מוליך (אופייני למפעלים כימיים).



איור 20: מילוי מיכל ללא טובלן מותר רק במהירויות נמוכות מ-1 מטר לשנייה



איור 21: מילוי באמצעות טובלן

יש להקפיד על מספר איסורים:

- אין להשחיל פתיל מוליך בתוך צינור בלתי מוליך (ראו איור 15).
- שימוש ב"טבעת טנטלום" מוארכת (טבעת מהמתכת טנטלום המיועדת לניטרול מיטענים אלקטרוסטטיים) אינו מומלץ מכיוון שאינו יעיל בניטרול מיטענים סטטיים מנוזלים מבודדים. טבעות מתכת (שאינן עשויות טנטלום), או חלקי מתכת מוארכים היוצרים מגע עם הנוזל - עלולים לגרום לפריקה אלקטרוסטטית.
- בחיבור קטעים של צינור בלתי מוליך אין להשתמש באוגנים מוליכים אשר יכולים ליצור מגע עם הנוזל או עם אדי הנוזל (לגבי נוזל דליק). ניתן להשתמש באוגני מתכת רק אם ההתקנה חיצונית ומעל לצינור בלתי מוליך. יש לאטום היטב את הצינור בפני דליפת נוזל או אדים. יש לבדוק את שלמות הצנרת בכל יום ולדווח מיד למנהל התפעול על כל פגם בצנרת. רצוי להשתמש בגלאים המתריעים על דליפת אדים דליקים.

בחישה וחימום בריאקטור

שני התהליכים יחד, וכל אחד לחוד, עלולים ליצור חשמל סטטי בנוזל. הריאקטורים מצופים בדרך כלל מבפנים בזכוכית או בטפלון, ולכן - עקרונית - אין סיכוי להיווצרות מנגנון כשל. יש להקפיד שלא להחדיר עצמים מתכתיים לתוך המיכל. בחלקו העליון של המיכל עלולים להימצא אדים ורסס דליקים/ נפיצים. לכן, במהלך חימום ובחישה, אין לפתוח את המכסה העליון של המיכל (לצורך נטילת דגימה של החומר, לדוגמה). אם צריך ליטול דגימה - יש לבצע זאת בדומה לדרך המוצגת באיור מס' 30. בטיפול ב- CS_2 יש לאדש את האווירה מעל לנוזל ע"י שטיפה בחנקן. לא מומלץ להשתמש ב- CS_2 עקב חשש להיווצרות קרח יבש, אשר יגרום להצטברות חשמל סטטי. בעת פעולת התגבשות של נוזל לגבישים עלולים להיווצר בגביש מיטענים אלקטרוסטטיים, אשר יחוללו שדה סטטי גבוה במיוחד. כאשר הגביש צמוד לציפוי מבודד דקיק - השדה החשמלי עלול לפגוע בשלמות הציפוי (על-ידי ניקובו). כאשר קיים חשש כזה ונעשה שימוש בממיסים דליקים - רצוי לבצע את תהליך ההתגבשות באווירה אדישה.

זיקוק בוואקום דרך עמודת זיקוק

סכנת היווצרות מיטענים סטטיים איננה משמעותית כאשר יש זרימה איטית של נוזלים. תודות לוואקום האווירה אדישה, בתנאי שהנוזל המזוקק אינו מחמצן (מכיל תרכובת עתירת חמצן המאפשרת בעירה ללא אוויר. לדוגמה: פראוקסיד). במקרה של חדרת אוויר, עמודת הזיקוק הגדושה אדים בריכוז כמעט רווי איננה מאפשרת היווצרות אדים בריכוז נפיץ. מכל מקום, עם גילוי דליפת אוויר - יש להפסיק את פעולת הזיקוק ולהמתין מספר דקות עד לשקיעה כמעט מוחלטת של האדים והנוזלים, ולטפל בבעיה רק לאחר-מכן.

מילוי חביות או מיכלים בתוצרת או בחומרי-ביניים

מילוי מיכלים בחומרי-ביניים או בתוצרת מוגמרת כרוך בשינוע נוזלים או חומר היברידי - נוזל ומוצקים (אבקה גבישית) - או של אבקה/גרגרים אורגניים יבשים. מילוי חביות ומיכלים יעשה תמיד על-ידי טובלן המגיע עד קרקעית המיכל. אם המיכל מבודד על-ידי ציפוי פנימי או עשוי מחומר מבודד, יש להקפיד על טובלן בלתי מוליך או עשוי מטפלון אנטיסטטי.

נוזלים דליקים (ממיסים) שהתנגדותם החשמלית הסגולית נמוכה מ- 10^8 אוהם/מטר ($10^8 \Omega m$), ניתן להזרים אל תוך מיכלים מבודדים דרך צנרת מבודדת. נוזלים שהתנגדותם החשמלית הסגולית גבוהה, רצוי להזרים דרך צנרת מוליכה אל תוך מיכלים או חביות העשויים מחומר מוליך, ואשר מהווים מערכת מוארכת שוות פוטנציאל. מיטענים סטטיים שהצטברו בנוזלים מבודדים יכולים להישאר בתוך הנוזל במשך שבועות. הסכנה קיימת בעיקר אם הנוזל יבוא, בהמשך, במגע עם גוף מתכתי, ותיווצר פריקה אלקטרוסטטית דרך תווך של אדים דליקים. משום כך, יש להעביר

את הנוזל המבודד ממיכלים/חביות מבודדים אל מיכלי מתכת בהזרמה איטית מאוד, כדי למנוע רסס ואדים. יש לוודא שהמיכל מוארק היטב. מומלץ מאד להשתמש בצינור ובטובלן עשויים מטפלון מוליך, או כל חומר אחר בעל תכונות של פיזור מיטענים סטטיים. רצוי לאדש את האווירה על-ידי שטיפת המיכל בחנקן. טיפול כזה יעיל בעיקר במערכות סגורות.

קיים יתרון מסוים בשימוש במיכלים/חביות מבודדים. במקרה של בריחת אדים מתוך המיכל והיווצרות אווירה נפיצה ליד המיכל ומחוצה לו, לא תיתכן פריקה אלקטרוסטטית בעלת עוצמה רבה מאדם טעון במיטען א"ס אל דופן המיכל. הקטנת היווצרות מיטענים אלקטרוסטטיים בעת הזרמת כימיקלים בעלי טמפרטורת הבזק נמוכה, נעשית על-ידי הגבלת מהירות הזרימה או אידוש על-ידי חנקן. להלן מספר דוגמאות:

חומר	התנגדות נפחית ביחס ל- $10^8 \Omega m$	טמפ' הבזק °C	תחום נפיצות %	הגבלת מהירות זרימה	אידוש אווירה
Carbon disulfide	גבוהה	-30	1-50	נדרש	נדרש
Toluene	גבוהה	4.5	1.3-7	נדרש	נדרש
Chlorobenzene	גבולית	28	1.3-7.1		גבולי
Methylamine	נמוכה	0	4.3-21		נדרש
Methyl alcohol	נמוכה	12	6-36.5		נדרש
Isopropanol	נמוכה	12	2.3-12.7		נדרש
Heptane		-4	1-7	נדרש	נדרש
Ethyl acetate	נמוכה	-4.5	2.2-9		נדרש
Ethyl alcohol	נמוכה	12	3.3-19		נדרש
Dimethylamine	נמוכה	-6.7	2.8-14.4		נדרש
Cyclohexane	גבוהה	-20	1.3-8.4	נדרש	נדרש
Acetone	נמוכה	-17	2.6-12.8		נדרש
Actonitrile	נמוכה	5.5	4.4-16		נדרש
Benzene	גבוהה	-11	1.3-8	נדרש	נדרש
Allyl alcohol	נמוכה	22	2.5-18		נדרש

בשעת יניקת חומר גלם בוואקום מחביות לריאקטורים, באמצעות צינור גמיש, יש להקפיד על הזרמת הנוזל אל תחתית הריאקטור. בהתחלה יש לבצע שאיבה הדרגתית עד שתיווצר שיכבת נוזל אשר תכסה את מוצא הטובלן. אם ההתנגדות הסגולית של החומר גבוהה מ- $10^8 \Omega \cdot m$ והכנסת הנוזל מבוצעת מפתח עליון ללא טובלן - יוצרו רסס ואדים דליקים. ריכוזם עלול להיות מסוכן בהתחלת השאיבה, כאשר לא נוצר עדיין ואקום מספיק. יש לאדש את האטמוספירה בתוך הריאקטור על-ידי:

(א) יצירת ואקום אשר ריכוז האוויר בו נמוך מ-5%, או:
 (ב) שטיפת האוויר בחנקן ואח"כ מילוי על-ידי שאיבת ואקום. רצוי להשתמש בצינור גמיש עשוי מטפלון מוליך. חביות עשויות מתכת יש להאריק, ולקשור אל הצינור באמצעות חבק מתכתי (מוליך).

לריאקטור המצופה בחומר מבודד יש יתרון: גם כאשר הנוזל ואדיו מגיעים טעונים, לא תיתכן פריקה אלקטרוסטטית אל הריאקטור.

הפרדה בין נוזלים בלתי מסיסים (לדוגמה: מים וטולואן)

הפרדה בין נוזלים מבודדים בלתי מסיסים יוצרת טעינה אלקטרוסטטית. התופעה חריפה כאשר אחוז המים בנוזל המבודד גבוה מ-0.1%. האמצעים הנדרשים למניעת סכנה של מנגנון הכשל:

(א) הצינור או המיכל שבהם מצויים שני נוזלים בלתי מסיסים יהיה מלא, ככל שניתן.
 (ב) מהירות הזרימה של הנוזלים בצנרת תהיה מוגבלת על-פי הטבלה הבאה:

קוטר צינור (מ"מ)	≤ 40	50	80	100	200	400	600
מהירות (מ' בשנייה)	7.0	6.0	3.6	3.0	1.8	1.3	1

מנגנון כשל של פריקה אלקטרוסטטית באבקות

הזנת חומר גלם, אבקתי או מגורען, לריאקטור

חומר גלם אבקתי או מגורען בעל תכונות של מבודד חשמלי, ייטען במיטען א"ס בחיכוך עם משפך בעל ציפוי מבודד. אין סכנה שהחומר המגורען יוצת עקב פריקה אלקטרוסטטית. עם זאת, חלקיקים קטנים של החומר או נוכחות של אדים דליקים, מהווים סיכון לקיום מנגנון כשל. מנגנון הכשל יתממש כאשר במוצא המשפך ימצא גוף מתכתי בלתי מוארק. לכן, בשפיכת חומרים מגורענים או אבקתיים - אין להרשות הימצאות עצם מתכתי כלשהו שאינו מוארק במוצא המשפך. השימוש בחנקן לאידוש האטמוספירה אינו חיוני. יש לבדוק כל מקרה לגופו.

שינוע אבקות באמצעות יניקת ואקום

בשינוע אבקות דרך צינור פלסטיק מבודד וביניקת ואקום, הצינור עשוי לצבור מיטען סטטי ניכר, במיוחד כאשר החומר המשונע הוא בעל התנגדות נפחית גבוהה. קיימת סכנה לפריקה אלקטרוסטטית כאשר בקצה הצינור המבודד מותקן צינור מתכת לא מוארק. חלק זה יתנהג כ"נשאן" של מיטען סטטי והוא עלול לשחרר, בשלב כלשהו, פריקה אלקטרוסטטית דרך אטמוספירה נפיצה המכילה אבקה עם אוויר. **פתרונות:** שימוש בצנרת מוליכה, כגון טפלון אנטיסטטי; ו/או שימוש בצנרת פלסטיק, אשר בתוכה טמון תייל מתכת לוליני, המאפשר להאריק את קצה הצינור (כשהקצה עשוי מתכת).

הזנת אבקה מבודדת למיכל מתכת

אבקות, שהן מבודד חשמלי טוב, עשויות להיטען בקלות עד למתחים אלקטרוסטטיים של עשרות קילו-וולט. אבקות כאלה יכולות להיות טעונות במיטען חשמלי משמעותי עוד לפני הזנתן למיכל. בנוסף, בעת הזנתן, לצינור מבודד חשמלית - חיכוך האבקה בצינור ההזנה, והפרדת האבקה בהיכנסה למיכל, יוצרים טעינה אלקטרוסטטית נוספת. במהלך הזנת מנות האבקה האחרונות למיכל קיימת סכנה מוגברת של הצתה, עקב היווצרות ערימה קונית גבוהה של אבקה בתוך המיכל (ראו איור 9). כאשר האבקה בקונוס טעונה במיטען אלקטרוסטטי ניכר - נוצר שדה א"ס חזק בין ערימת האבקה לבין דפנות מתכת סמוכות. גובה הקונוס עולה ככל שמילוי המיכל מתקדם, והחומר מתקרב לדופן העליונה של המיכל, מה שמגביר את השדה האלקטרוסטטי בינו לבין דופן המיכל. הפריקה האלקטרוסטטית תתאפשר כאשר עוצמת השדה מתגברת על התנגדות האוויר, וכמות האוויר המיונן במיכל מאפשרת הולכה.

פריקת קונוס עלולה לשחרר אנרגיה רבה אשר תצית אווירה שבה מצויים אדים של ממיס או אבקה אורגנית דליקה. אנרגיית הפריקה מקונוס של אבקה מבודדת טעונה גבוהה במיוחד כאשר המיכל עשוי ממתכת. במיכל "צילינדר" הפריקה האלקטרוסטטית מקיפה את הקונוס בתנועה מעגלית, והיא נקלטת, בסופו של דבר, בדופן המיכל. במהלך הפריקה נוצרת טמפרטורה גבוהה בתוך והיא מהווה מקור הצתה של חומרים דליקים המרחפים במיכל.

הגורמים המשפיעים על פריקת הקונוס מורכבים מאוד וכוללים, בין השאר:

- התנגדות חשמלית של האבקה המוזנת למיכל. הסכנה גוברת ככל שהאבקה מבודדת יותר;
- ספיקת האבקה למיכל;
- נפח וגיאומטריית המיכל;
- סוג החומר שממנו עשוי המיכל (מתכת גלויה מסוכנת במיוחד);
- נפח וגיאומטריית האבקה המוזנת למיכל;
- גודל גרגרי האבקה (ככל שהגרגרים קטנים יותר - הסיכון גובר).

על פי מחקרים ותצפיות שנעשו בשנים האחרונות, ניתן להעריך את האנרגיה אשר תתפרק דרך החומר הדליק בפריקת קונוס. אנרגיה זו קשורה במיוחד ל-2 פרמטרים גיאומטריים: קוטר המיכל וגודלם הממוצע של גרגרי האבקה. האנרגיה אשר משתחררת בפריקת קונוס במיכל בקוטר שבין 0.5 ל-3 מטרים, וגרגרים בקוטר ממוצע של 0.1 עד 3 מ"מ. הנוסחה היא:

$$W = 5.22 \times D^{3.36} \times d^{1.46} \quad (\text{mJ})$$

כאשר:

W - אנרגיית פריקה הקונוס ביחידות מילי-ג'אול (mJ)

D - קוטר המיכל המוארק במטרים.

d - הקוטר הממוצע של חלקיקי האבקה במיקרומטר (μm).

מהנוסחה ניתן לראות כי אנרגיית הפריקה עולה ככל שקוטר הגרגר גדול יותר. התרחיש המסוכן ביותר הוא הזנת חומר מגורען הכולל בתוכו פרקציות אבקה קטנות לתוך המיכל. הפרקציות נטות לרחף בקלות ויוצרות אווירה דליקה בעת ההזנת החומר.

פתרונות אפשריים

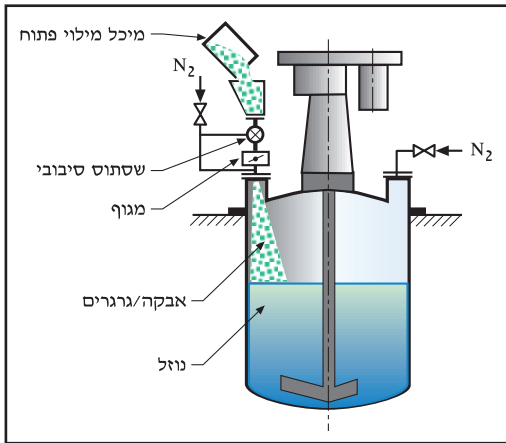
א) מניעת פריקה אלקטרוסטטית עקב אבק טעון במיטען אלקטרוסטטי:

ניתן לפרוק מיטען רק בתוך המיכל עצמו. ניתן לעשות זאת על-ידי עירבול החומר במשך מספר דקות, לאחר הזנת המיכל בתוכן של מספר חביות. יש למנוע עלייה של גובה קונוס האבקה, כדי למנוע את הגברת השדה האלקטרוסטטי בין החומר ובין דפנות המיכל. עירבול-ביניים של החומר, לאחר הטענת מספר חביות, יאפשר היווצרות מיפלס שטוח של חומר.

הדרך המומלצת ביותר להקטנת המיטענים הסטטיים ולמניעת עליית גובה הקונוס היא הזנה צידית של האבקה למיכל. בדרך זו האבקה המוכנסת למיכל מחליקה על הדופן הפנימית. לטכניקת הזנה זו יש 2 השפעות חיוביות:

1. אבקה המחליקה על הדופן תשחרר את המיטענים הסטטיים האגורים בה והיא תיטען במידה פחותה מזו של אבקה בנפילה חופשית;
2. צורת הערימה המתגבהת במיכל תהיה מישור משופע במקום קונוס. צורה זו של ערימת אבקה טעונה איננה מעודדת היווצרות שדה גבוה ופריקה אלקטרוסטטית רבת עוצמה אל הדופן.

(ב) **קולטן למיטענים סטטיים:** היווצרות שיכבה מבודדת (liner) של אבקה על-פני כל הדופן הפנימית של המיכל יכולה למנוע פריקה אלקטרוסטטית אנרגטית בין החומר לבין הדופן. ייתכן שעירבול הביניים, המומלץ בסעיף הקודם, ייצור ציפוי של שיכבת אבק. בכל מקרה, עירבול החומר יאפשר שחרור מיטענים סטטיים בין אבק טעון חיובית לבין אבק טעון שלילית. כמו כן, יתאפשר ניטרול מיטענים סטטיים בעת מגע של חלקיקי אבק טעונים בדפנות המיכל, שאינן מצופות בשיכבת אבקה עבה.

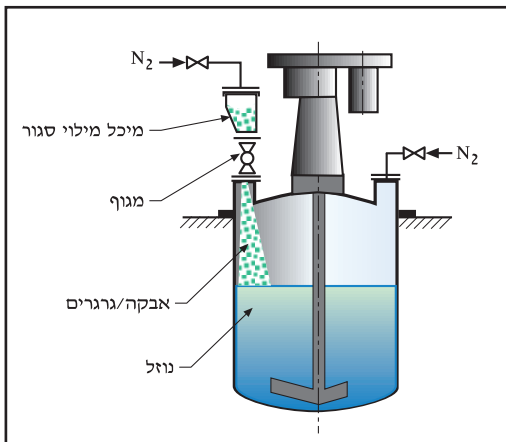


איור 22: אידוש על-ידי חנקן, שפיכה ממיכל מילוי פתוח

(ג) **אווירה נפיצה:** אווירה נפיצה קיימת באזורים של ריכוז נמוך יחסית של אבקה מרחפת באוויר, וריכוז חמצן גבוה. בשאיבת ואקום של אבקה לתוך מיכל תיתכן היווצרות אווירה נפיצה על-ידי מערכת היניקה. לכן, יש להבטיח שאיבה יעילה של האבקה המרחפת במיכל. ניתן וצריך להקטין את ריכוז האבקה באוויר (משקל אבקה המרחפת בגרמים, למטר מעוקב אוויר) בשיעור 25%-60% מתחום הדליקות, התחתון, של האבקה עם אוויר.

בחינת תמיסות עם מוצקים

תהליך זה עלול ליצור כמות ניכרת של מיטענים סטטיים במוצקים ובתמיסה. אם התמיסה מוליכה (התנגדות נמוכה מ- $10^8 \Omega m$) יתאפשר פיזור יעיל של מיטענים. אם התמיסה מבודדת - לא יתאפשר פיזור המיטענים האלקטרוסטטיים. יש להבטיח שבכל שלבי התהליך לא ייווצר מגע כלשהו בין התמיסות לבין אלמנט מתכתי מוארק או "צף". השימוש בריאקטורים מבודדים באמצעות זכוכית או טפלון עונה על דרישה זו. כאשר הציפוי המבודד של דפנות הריאקטור

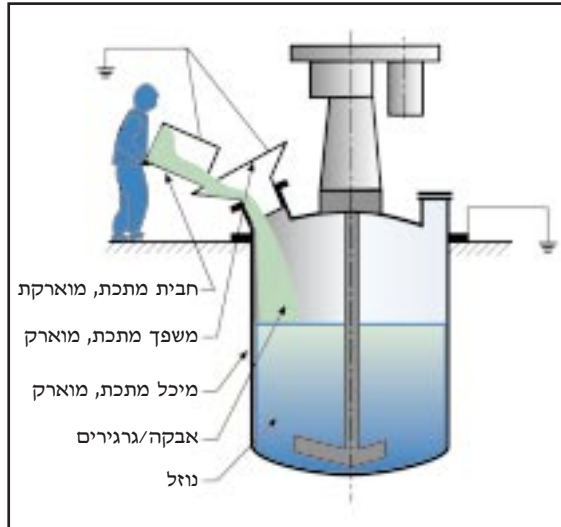


איור 23: אידוש על-ידי חנקן, שפיכה ממיכל סגור

דק מדי, קיימת סכנה שהשדה הסטטי - שנוצר בין המוצקים למיכל המתכת החיצוני של הריאקטור - יגרום לניקובו. כאשר מתקיים מצב כזה, מדי פעם - מומלץ לעבור לריאקטור בעל ציפוי מחומר מבודד שחוזקו הדיאלקטרי (יכולת המבודד לעמוד בפני מתח גבוה) גבוה יותר.

ניתן למנוע היווצרות אווירה דליקה/פצצה על-ידי אידוש הנפח שמעל התערובת, באמצעות חנקן (N_2) (ראו איורים מס' 22 ומס' 23).

אין להשתמש בריאקטור מפלסטיק, כאשר שופכים אבקה לתוך נוזל דליק או כשהאבקה עצמה ספוגה בנוזל דליק, או כאשר הנוזל טעון מראש במיטען אלקטרוסטטי.

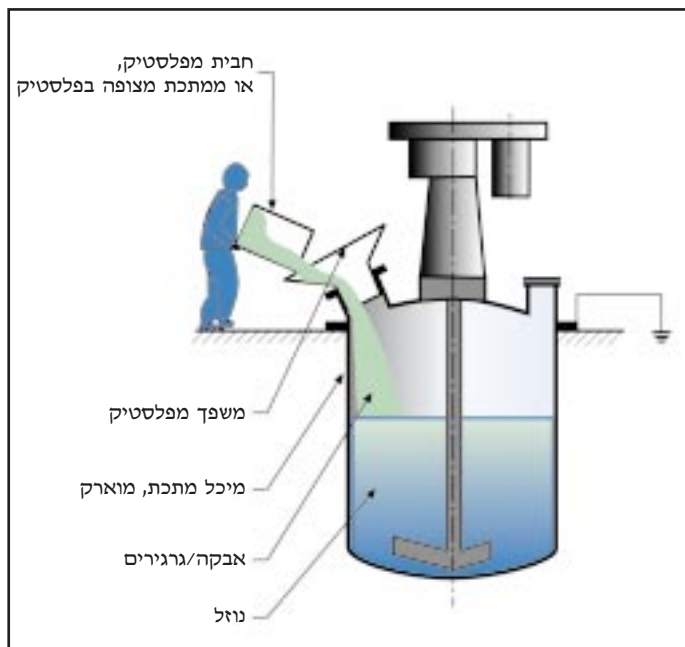


איור 24: הריאקטור ושאר הרכיבים עשויים ממתכת ומוארקים. הריאקטור מותר לשימוש, מבחינה אלקטרוסטטית, לכל החומרים

ייבוש מוצקים

במערבל עם ואקום

ייבוש מוצקים בוואקום מונע היווצרות אווירה נפיצה באזור המוצקים. יש להקפיד שלא יימצאו מקורות הצתה כלשהם באזור פינוי האדים - כאשר אוויר מתערבב באדים. קיום מנגנון הכשל של פריקה אלקטרוסטטית אינו סביר בתנאים אלה.



איור 25: חלק מרכיבי המיכל עשויים מפלסטיק. אסור להשתמש בריאקטור עם חומרים דליקים

פריקת אבקות יבשות מכלי הייצור אל מכונות האריזה

בתהליך זה אין סכנה שמיטען סטטי, האגור באבקות, יתפרק ויגרום להתלקחות או להתפוצצות. עם זאת, יש חשש שכאשר האבקה מסיימת את נפילתה החופשית תיווצר באזור האריזה עננת אבק נפיץ. אדם טעון בחשמל סטטי, המתקרב לקולטן (גוף מתכתי מוארק) עלול לגרום לפריקה אלקטרוסטטית דרך עננת האבק הזאת ולהביא בכך להצתת האבק. כדי למנוע סכנת פריקה אלקטרוסטטית בתחנה זו, יש לשאוב את האוויר ולדלל במהירות כל התפתחות של ריכוז נפיץ של אבקה. בנוסף לכך, העובדים בתחנת האריזה יהיו נעולים בנעליים אנטי-סטטיות מפזרות מיטענים, ולבושים בבגדי כותנה.

אדם טעון אלקטרוסטטית יפרוק מעצמו מיטענים בבואו במגע עם אביזרי מתכת מוארקים. לדוגמה: בשעת ביצוע גישור מוליך בין רכיבי מערך המילוי. מכיוון שהיווצרות מיטענים א"ס היא תהליך מתמשך כל עוד העובד נמצא בתנועה - מומלץ לצייד את כל העובדים במקומות עתירי סיכון בבגדי כותנה ובנעלי עבודה אנטי-סטטיות. יש להימנע מנעילת נעליים מבודדות ומלבישת בגדים סינטטיים.

מדידת השדה האלקטרוסטטי

מדידת שדה אלקטרוסטטי נועדה לענות על השאלה הבסיסית הבאה: האם קיימים תהליכי שינוע, עיבוד ואחסנה שבהם רכיב כלשהו יכול להיות טעון במיטען א"ס?

קיימים מכשירים שונים למדידת השדה הא"ס. בחלק מהמכשירים הקריאה היא ביחידות של שדה kV/m (קילו-וולט למטר) או ביחידות של פוטנציאל אלקטרוסטטי kV (קילו-וולט).

שדה אלקטרוסטטי מודדים באזור אשר בו אין אלמנטים מתכתיים בין המודד לבין החומר הנבדק.

מד שדה א"ס אינו מכשיר מוגן פיצוץ בדרך-כלל. ולכן בעת ביצוע מדידות באזור שבו תיתכן אווירה נפיצה/דליקה - יש לנקוט אמצעי זהירות מיוחדים, אשר לא יאפשרו הצתה עקב פעילות חשמלית של המכשיר.

רצוי למדוד טעינה אלקטרוסטטית של חומרים במקום הימצאותם. כאשר הדבר אינו אפשרי - המדידה תיעשה על-ידי הוצאת חומר, החשוד כטעון א"ס, באמצעות כלים מבודדים חשמלית, והעברתו אל מכשיר המודד מיטען חשמלי. חלופה מוצלחת פחות: ניתן להעביר את החומר לכלי לא מוליך (זכוכית, קרמיקה) ולמדוד את נוכחות המיטען באמצעות מד שדה חשמלי. לפני המדידה יש לוודא שכלי הקיבול נקי ממיטענים סטטיים.

בנוסף למדידת טעינה אלקטרוסטטית - ניתן כיום למדוד תופעות של פריקה אלקטרוסטטית באמצעות מכשירים המכונים בשמות כמו: EMI/ESD Counter או EMI/ESD locator. אלה הם מכשירים דיגיטליים הכוללים אנטנה, מקלט זעיר רחב סרט, מערכת לאגירת תוצאות המדידה ומערכת עיבוד נתונים. גודלם של המכשירים המסחריים הקיימים הוא כמידת כף יד, ומשקלם מאות גרמים בסך הכל.

מערכות מדידה כאלה מבוססות על קליטת פולס הקרינה האלקטרומגנטית, המשודר בעת אירוע פריקת הבזק והמשתרע מתדר נמוך מאוד עד לתדר בתחום ה-GHz. על סמך הניסיון, שיטה זו יעילה מאוד כאשר לא קיימת גישה ישירה לחומר המעובד בתוך מיכל, או כשהחומר המוזרם במערכת, דבר שאינו מאפשר לדגום את הטעינה האלקטרוסטטית של החומר. במקרה זה, מכוונים את האנטנה - הנראית על פי רוב כצילינדר בקוטר של 2-3 ס"מ - לכיוון החומר או המכונה שבה קיים חשד לאירוע פא"ס. המכשיר, בהתאם לכיוון רמת כיוול שדה חשמלי, יציג על מונה ספרתי את מספר הפריקות האלקטרוסטטיות אשר עברו את סף הייחוס, ואת עוצמת השדה החשמלי שנקלט. עוצמת השדה החשמלי מלמדת על עוצמת הפא"ס (לא ניתן לקבוע את העוצמה הזאת באופן מספרי, מדויק). כדי למנוע אזעקות שווא, יש לכוון את סף הייחוס של השדה החשמלי לרמה גבוהה ב-10% מעל רמת השדה החשמלי המצוי ברקע, בעת ביצוע הניטור של הפריקות האלקטרוסטטיות.