

Conductive FRP – תכנון אופטימלי עם ניטרול חשמל סטטי

איל צדוק

מהנדס מומחה לבקרת חשמל סטטי

מנתח סיכונים של אורה דליקה וציוד חשמלי

ת.ד. 108, הילה 24953, טל: 04-9572126, פקס: 04-9974585,

eyalzac@netvision.net.il

כל הזכויות שמורות

Conductive FRP – תכנון אופטימלי עם ניטרול חשמל סטטי

- הרצאה זו תציג גישה בה ניטרול הסיכון של חשמל סטטי מהווה בסיס לכל התכנון ההנדסי של מתקן תעשייתי.
- הרעיון המרכזי - פתרון חכם לניטרול חשמל סטטי במתקן, מאפשר תכנון הנדסי פשוט יותר של המתקן.
- תכנון הנדסי פשוט משמעותו: חומרי מבנה רגילים, מבנה פיסי פשוט, ציוד טכני רגיל, שיוצרים חיסכון בכסף ובזמן.
- היצור, ההתקנה, השימוש, התחזוקה - נוחים וזולים יותר.

Conductive FRP

- Fiber-Reinforced Plastic – FRP

- משפחת מוצרים זו כוללת חומרים המשמשים ליצור ציוד תעשייתי, בעיקר בתעשייה התהליכית.

- חומרים אלו משלבים יתרונות של משקל נמוך, בידוד חשמלי ועמידות מוגדלת בקורוזיה, לעומת התכונות של חומרים מתכתיים.

Conductive FRP

- Conductive FRP – חומרים מבוססי FRP אשר בתהליך יצורם עורבבו עם תוספים מיוחדים בכדי להקטין את ההתנגדות החשמלית שלהם.
- הקטנת ההתנגדות החשמלית מיועדת לאפשר הולכת מטעני חשמל סטטי מהצידוד התעשייתי אל הארקה, בנוסף לתכונות היסודיות של FRP רגיל.

דוגמאות של ציוד תעשייתי המיוצר מ- Conductive FRP

- צנרת להובלת נוזלים קורוזיביים-דליקים

(צילום: דני נוימן)



דוגמאות של ציוד תעשייתי המיוצר מ- Conductive FRP

• מכל לאיחסון/ערבוב נוזלים קורוזיביים-דליקים

(צילום: דני נוימן)



דוגמאות של ציוד תעשייתי המיוצר מ- Conductive FRP

• סטלר להפרדה של חומצה/ממס אורגני עם עפרת מתכת

(צילום: דני נוימן)



דוגמאות של ציוד תעשייתי המיוצר מ- Conductive FRP

• עמודות מיצוי עבור נוזלים קורוזיביים-דליקים

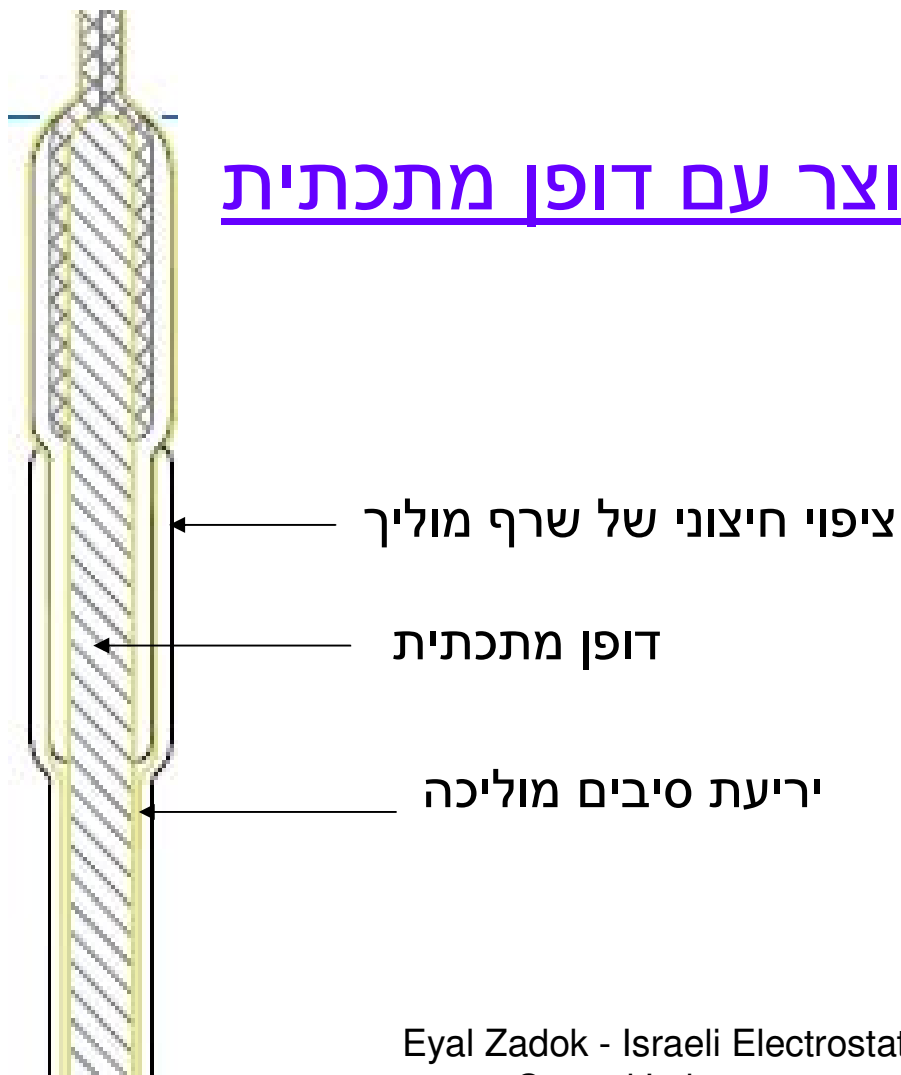
(צילום: דני נוימן)



טכניקות יצור של Conductive FRP

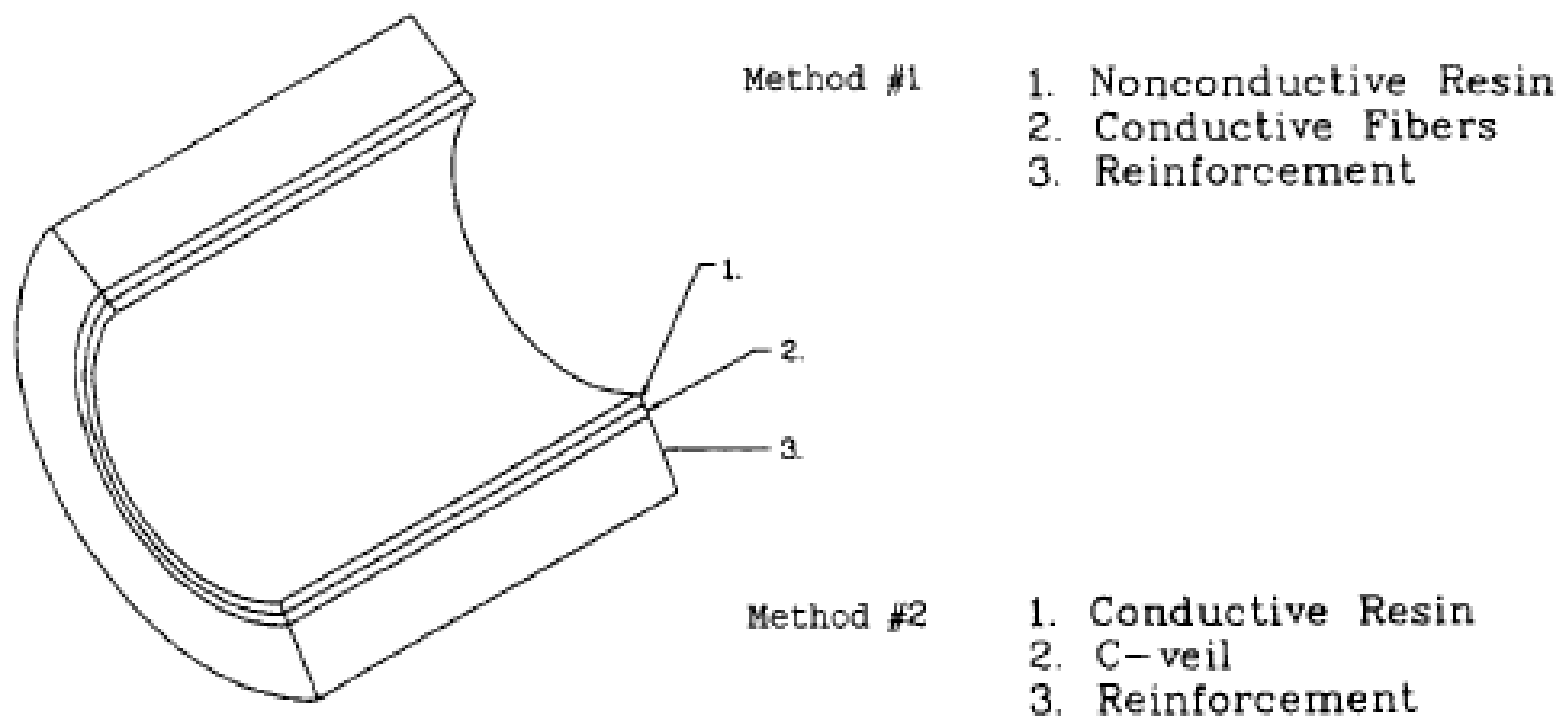
הרכב אופייני של מוצר עם דופן מתכתית

(צילום: דני נוימן)



טכניקות יצור של Conductive FRP

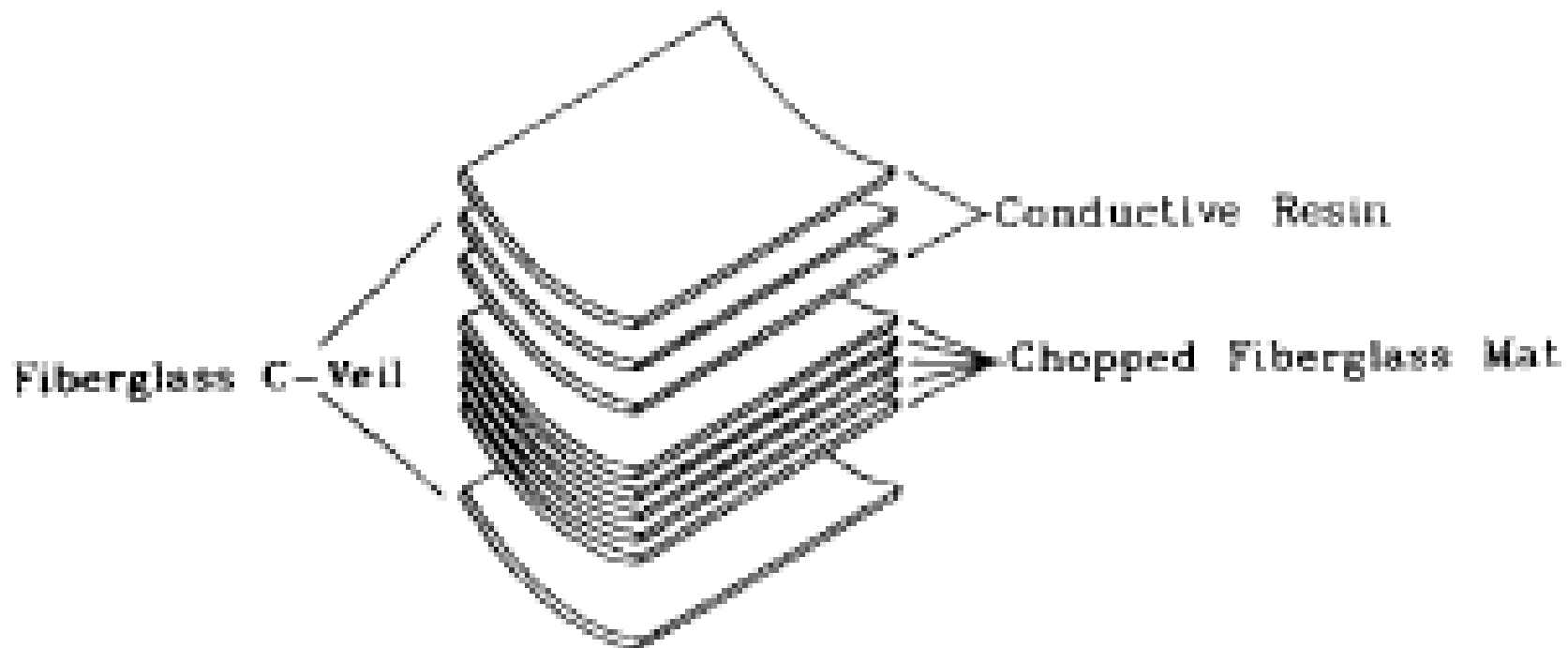
הרכב אופייני של מוצר עם דופן חיצונית מ-FRP



מתוך מאמר של su-seng pang et.al.

טכניקות יצור של Conductive FRP

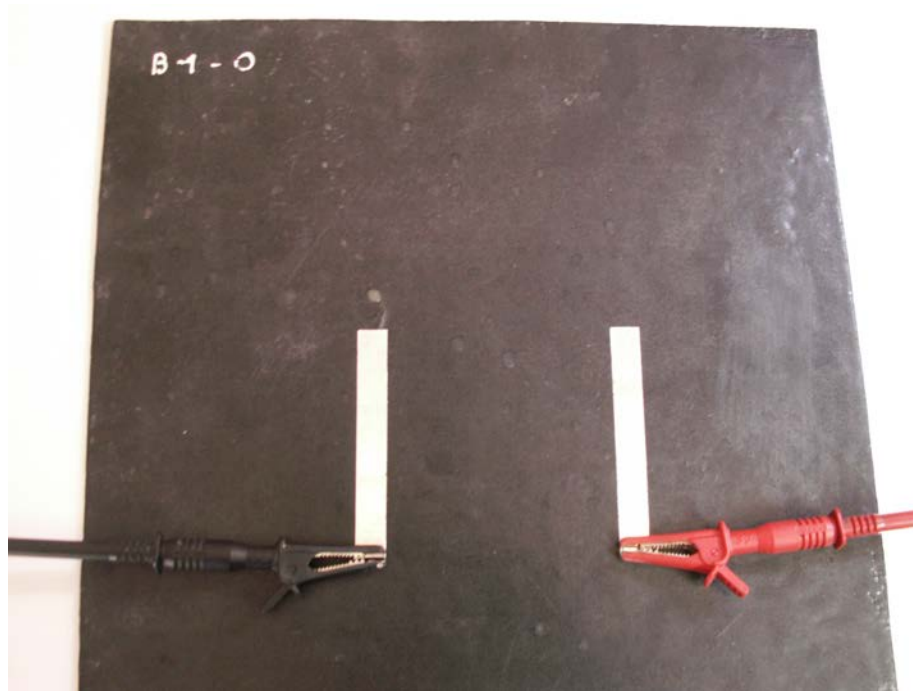
הרכב אופייני של מוצר עם דופן חיצונית מ-FRP



מתוך מאמר של su-seng pang et.al.

בדיקה חשמלית של Conductive FRP

בדיקת דוגמא של מוצר בתהליך פיתוח



מתוך מאמר של איל צדוק

יתרונות האופטימיזציה

הקטנת שטח הפנים של האזור המוליך על דופן הציוד

המטרה:

שימוש בכמות קטנה מאוד של חומר מוליך ביצור FRP,
על פני שטח מצומצם של דפנות הציוד, באופן שתתקיים
הולכה חשמלית מספקת לצורך סילוק מטעני חשמל
סטטי מהנוזל אל הארקה.

יתרונות האופטימיזציה

הקטנת שטח הפנים של האזור המוליך על דופן הציוד

(1) הוזלה משמעותית של עלות יצור הציוד

(2) קיצור משך זמן היצור של הציוד

(3) יכולת בדיקה חזותית של שכבות FRP בתהליך היצור

עקרונות האופטימיזציה

אבני הדרך להשגת האופטימיזציה

- ◆ ניתוח של תנועת הנוזל בתוך הציוד
- ◆ ניתוח של התנהגות השדה החשמלי בנוזל
- ◆ הגדרת הפזה הרציפה בתוך תערובת הנוזל
- ◆ קביעת המוליכות החשמלית של הפזה הרציפה
- ◆ חישובים מתמטיים

עקרונות האופטימיזציה

ניתוח תנועת הנוזל בתוך הציוד

ניתוח אופן תנועת הנוזל בתוך הציוד מאפשר להגדיר:

◆ **שטחי המגע הקבועים של הנוזל בדפנות הפנימיות**

◆ **מהירויות הזרימה במקטעים השונים של הציוד**

◆ **זמני שהיה של הנוזל במקטעי הציוד**

עקרונות האופטימיזציה

ניתוח התנהגות השדה החשמלי בנוזל

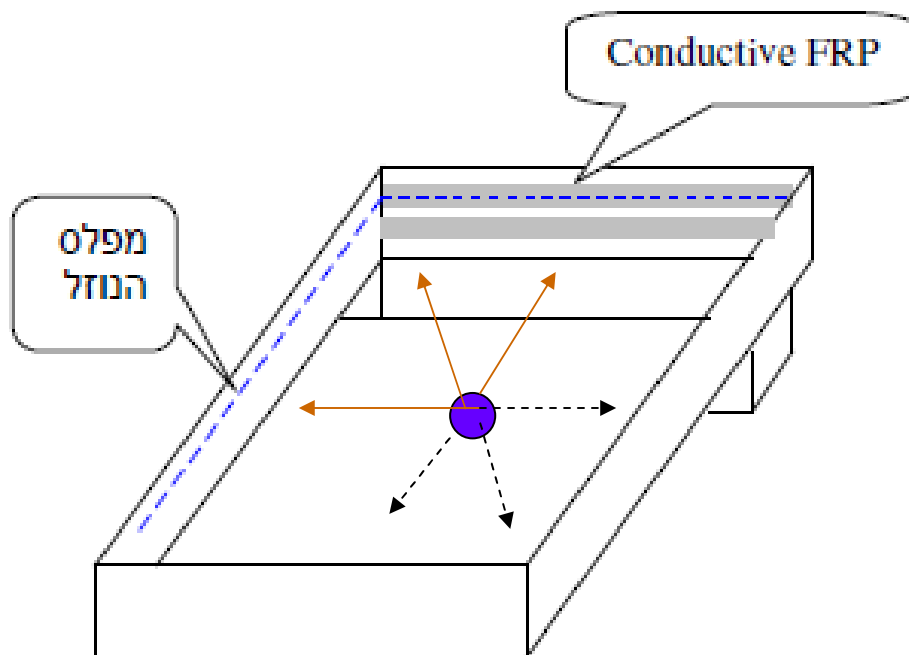
השדה החשמלי שנוצר ע"י המטען החשמלי בתוך הנוזל, הוא "הכוח המניע" אשר גורם לתנועת המטען החשמלי שנמצא בתוך הנוזל לכיוון הדפנות הפנימיות של הציוד, ומהדפנות אל הארקה.

המבנה והצורה של הציוד משפיעים על הפיזור המרחבי של השדה החשמלי. היות שהשדה החשמלי הוא וקטור, חלק מעוצמת השדה מופנה לכיוון שאינו מועיל לתנועת המטען החשמלי.

עקרונות האופטימיזציה

דוגמא להתנהגות השדה החשמלי בסטלר

שטח פני הנוזל אשר נוגעים באזור מוליך הוא שטח המגע בדפנות הצדדיות (עד קו מיפולס הנוזל) וגם שטח הקרקעית של הסטלר. השדה החשמלי שמופנה אל האזורים המוליכים של הסטלר הוא חלק מהשדה הכללי, ורק חלק זה הוא התורם לניטרול של המטען החשמלי בנוזל.



עקרונות האופטימיזציה

ההבעה המתמטית של השדה החשמלי בסטלר

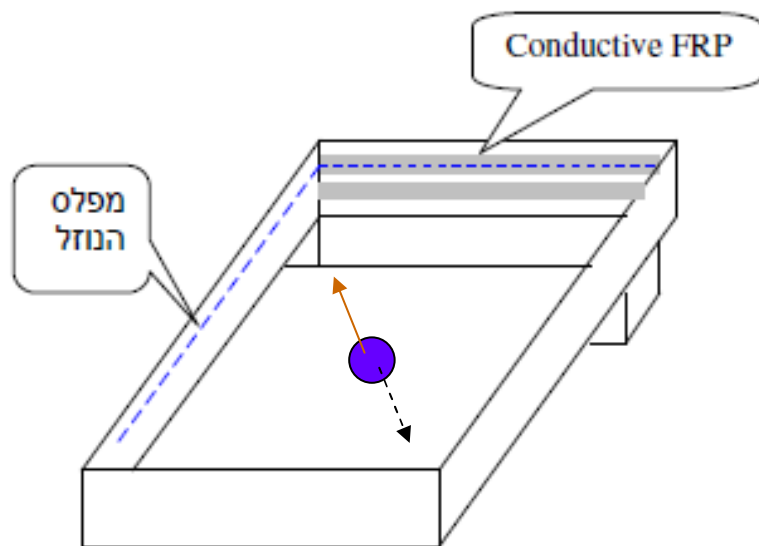
$F = (d \ell / \epsilon \ell) / (d \ell / \epsilon \ell + 2 d v / \epsilon v)$ – חלק השדה שאינו תורם לניטרול המטען החשמלי.

$d \ell$ – עומק פזה אורגנית בנוזל.

$\epsilon \ell$ – מקדם דיאלקטרי של הפזה.

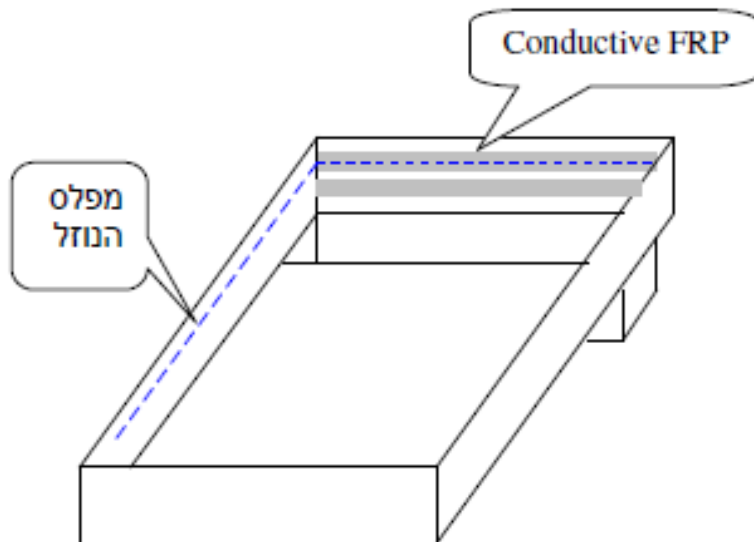
$d v$ – עומק חלל האדים בדופן מוליכה שהפזה האורגנית לא נוגעת בה.

ϵv – מקדם דיאלקטרי של האדים.



עקרונות האופטימיזציה

ההבעה המתמטית של השדה החשמלי בסטלר



מבחינה מעשית, הקיום של פני שטח
נוזל שאינם נוגעים באזור מוליך מגדיל
את זמן הדעיכה האפקטיבי של הנוזל
בפקטור של

$$1 / (1-F)$$

פקטור זה מחושב כחלק של השדה
החשמלי הכללי שבנוזל, כדלקמן:

$$1 / (1-F) = (d \ell / \epsilon \ell + 2 d v / \epsilon v) / (d \ell / \epsilon \ell)$$

עקרונות האופטימיזציה

הגדרת הפזה הרציפה בתוך הנוזל

הפזה הרציפה בתוך תערובת המורכבת משני נוזלים או יותר הינה הנוזל בעל הנפח הגדול ביותר בתוך התערובת. לענין זה הפזה הרציפה חייבת להכיל מעל 60% בנפח לעומת הנוזל השני בתערובת.

המשמעות המעשית של קיום פזה רציפה הינה קיום של רצף מולקולרי של הנוזל הזה, אשר עוטף "איים" של הנוזל השני. ניתן לראות זאת ככדורים המרחפים בתוך נפח הנוזל הרציף.

עקרונות האופטימיזציה

קביעת המוליכות החשמלית של הפזה הרציפה

המוליכות החשמלית של כל נוזל ניתנת למדידה במספר שיטות מעבדתיות, אשר מפורטות בתקנים שונים.

היות שמוליכות חשמלית של נוזל מושפעת מאוד מהטמפרטורה, ישנה חשיבות גדולה להכרת תנאי הסביבה בהם נמצא הנוזל בזמן תהליך היצור, ולביצוע בדיקת מוליכות בהתאם לתנאים אלו.

מחקרים שנעשו בנוזלים שונים הראו שבתחום מוליכות מסויים יש לנוזלים נטייה לייצר ולצבור מטען חשמלי בכמות גדולה במיוחד, לעומת התנהגות אותם הנוזלים כאשר מוליכותם קטנה או גדולה מתחום המוליכות הנ"ל. לכן, ישנה חשיבות רבה לידיעת הערך המעשי של המוליכות החשמלית של הנוזל.

עקרונות האופטימיזציה

חישובים מתמטיים

חישובים אלו מיועדים לקבוע את שטח הפנים המינימלי של האזור המוליך, אשר יקיים מסלול התנגדות חשמלית בעל קצב רצוי של זרימת מטען חשמלי מהנוזל אל הארקה.

הקצב הרצוי מאופיין ע"י קבוע הדעיכה τ_d אשר מגדיר את משך הזמן שבו יחלוף חלקיק נוזל על פני האזור המוליך. τ_d מחושב לפי יחס מסוים בינו לבין קבוע הדעיכה האפקטיבי τ_{eff} . ערכו של τ_{eff} מחושב לפי המוליכות החשמלית של הפזה הרציפה.

בכדי להבטיח ניטרול מלא של המטען החשמלי בנוזל בהתאם לחלק היעיל של השדה החשמלי, גם במצבים חריגים של תנאי סביבה בתהליך היצור וגם במצבי תקלה בתהליך, יש לקיים יחס מזערי של $\tau_d / \tau_{eff} = 100$.

הדגמת חישוב האופטימיזציה

דוגמא לחישוב רוחב רצועה מוליכה בסטלר

נתונים של המבנה והתהליך במערכת סטלר תעשייתית:

$R_E = 300 \text{ K}\Omega$ ערך אפקטיבי של
ההתנגדות החשמלית במסלול בין
הפזה הרציפה לבין הארקה של
דופן הסטלר.

קבוע דעיכה אפקטיבי: $\tau_{\text{eff}} \propto \gamma$
קבוע דעיכה רצוי: $\tau_d \propto \tau_{\text{eff}}$

$L = 6.75 \text{ m}$ אורך הסטלר,
 $H = 0.98 \text{ m}$ גובה הנוזל,
 $D = 3.34 \text{ m}$ רוחב הסטלר,

$F = 198 \text{ m}^3/\text{h}$ ספיקה כללית,
 $\gamma = 150 \text{ }\mu\text{S/m}$ מוליכות הפזה
הרציפה בסטלר,

הדגמת חישוב האופטימיזציה

דוגמא לחישוב רוחב רצועה מוליכה בסטלר

$$\tau_{\text{eff}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \left(\frac{1}{\gamma} + R_E \right) \quad \text{קבוע הדעיכה האפקטיבי}$$

$$\tau_{\text{eff}} = 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \left(\frac{1}{150 \cdot 10^{-6}} + 300 \cdot 10^3 \right) = 5.428 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

היות והמוליכות של הפזה הרציפה קרובה לגבול העליון של תחום המוליכות היוצר מטען גדול, נדרש יחס של 1:1000 לפחות, במקום

$$\tau_d / \tau_{\text{eff}} = 1000 \quad \text{יחס של 1:100 המקובל, לכן:}$$

$$\tau_d = 1000 \cdot 5.428 \cdot 10^{-6} = 5.428 \cdot 10^{-3} \text{ sec} \quad \text{לפיכך:}$$

הערך של τ_d מאפיין את זמן המגע שנדרש לנוזל באזור המוליך.

הדגמת חישוב האופטימיזציה

דוגמא לחישוב רוחב רצועה מוליכה בסטלר

בכדי לנטרל את המטען החשמלי, יש לאפשר לנוזל זמן מגע עם "אזור מוליך" על פני הדופן של הסטלר. זמן המגע שיאפשר ניטרול של כל המטען החשמלי מהנוזל, הינו:

$$t_d = 5 \cdot \tau_d = 5 \cdot 5.428 \cdot 10^{-3} = 0.02714 \text{ sec} \quad \text{זמן המגע הנדרש:}$$

בכדי שהנוזל יחלוף על פני "אזור מוליך" במשך זמן המגע הנדרש, יש לחשב את ממדי האזור המוליך עפ"י מהירות הזרימה של הנוזל וזמן המגע הנדרש. מהירות זרימת הנוזל הינה:

$$v = F / H \cdot D = 198 / 3600 \cdot 0.98 \cdot 3.24 = 0.0173 \text{ m/sec}$$

לפיכך, הרוחב של האזור המוליך הינו:

$$\ell = v / t_d = 0.0173 / 0.02714 = 0.64 \text{ m}$$

הדגמת חישוב האופטימיזציה

דוגמא לחישוב רוחב רצועה מוליכה בסטלר

רוחב האזור המוליך : $\ell = v / t_d = 0.0173 / 0.02714 = 0.64 \text{ m}$

הרוחב המחושב של האזור המוליך מאפשר לתכנן אזור בצורת רצועה צרה וארוכה לכל רוחב הסטלר, ולמקם את הרצועה במיקום כזה שיתקיים מגע קבוע בינה לבין הנוזל שנע בתוך סטלר. בתמונה הבאה מוצג סטלר עם רצועה מוליכה על פני הדופן:



מימוש הנדסי של האופטימיזציה

סטלר לעיבוד עפרות מתכת במפעל ביפן

סטלר המשמש להפרדה בין פזה מימית של חומצה לבין פזה אורגנית של קרוסין וממס אורגני. רצועה מוליכה אופקית לניטרול המטען החשמלי, ושלוש רצועות אנכיות להשוואת פוטנציאלים:

האופטימיזציה תוכננה ע"י איל צדוק ובוצעה בפיקוח דני נוימן.

סטלר בשיטה הרגילה

