

מערכת ZLD להתייעלות במים ושפכים במפעלי מתכת

ד"ר עוזי דגן, מומחה לכלכלה מעגלית והתייעלות במשאבים, המרכז לתעשייה מתקדמת

מבוא

מערכת ZLD (Zero Liquid Discharge) מהווה פתרון מקיף לצמצום משמעותי של פינוי נוזלים בתעשיית המתכת. התהליך כולל טיפול מקדים, אוסמוזה הפוכה וטיהור יוני, ואידוי להפקת פסולת מוצקה. הצורך בפתרונות מסוג זה נובע משילוב של מגמות ברורות בתעשייה: עלייה מתמדת בעלויות המים והשפכים, הסכנה הסביבתית של דליפות שפכים דרך מערכות הביוב וההטמנה, והצטברות של בוצה מסוכנות באתרים שמספרם מצטמצם. בניגוד לגישות טיפול "בקצה הצנרת" - המתמודדות עם הבעיה לאחר היווצרותה - מערכת ZLD מטפלת בשורש הבעיה. היא מפרידה את הזרמים מראש, ממחזרת את המים למקורם, ומפחיתה באופן דרמטי את יצירת השפכים והבוצה כבר בשלב התהליך. במאמר זה נפרט על כל שלב במערכת, נדגים את עקרונות הפעולה בהרחבה, ונבחן מקרה בוחן מתעשיית המתכת הישראלית.

עקרונות המערכת – ZLD

פעולת המערכת כוללת לרוב ארבעה שלבים מרכזיים:

1. טיפול מקדים (Pre-treatment)

שלב זה הינו קריטי, טיפול מוקדם איכותי מגן על שלבי ה-RO והאידוי, מאריך חיי ציוד וחוסך בעלויות תפעול. מטרת הטיפול המקדים נועד להסיר מזהמים גסים, שמנים, שומנים, חומרים מוצקים ולקיים איזון pH ולרוב כולל:

- מסנני רשת (Screen Filters)
- מפרידי שמן-מים (API / Oil Skimmers)
- מערכות נטרול חומצה / בסיס
- תהליכי שיקוע כימי (Coagulation-Flocculation)

2. אוסמוזה הפוכה (Reverse Osmosis - RO)

טכנולוגיה המבוססת על לחץ גבוה להעברת מים דרך ממברנות חצי חדירות.

התוצאה: מים מטוהרים בצד אחד, ורכז (Brine) בצד שני.

- שלב ראשון - הסרה של 90%–95% מהמומסים.
- שלב שני - פוליש נוסף למים לשימוש חוזר (לעיתים RO נוסף או DI, ראו סעיף הבא)

3. טיהור יוני (Deionization - DI)

מערכת DI מסירה יונים חיוביים ושלייליים מהמולקולות המימיות באמצעות שרפים מחליפי יונים.

- כולל מחליפי יונים קטיוניים ואניוניים.
- מניבה מים עם מוליכות נמוכה במיוחד
- מתאימה לשטיפות סופיות, בעיקר במקני ניסוי ובשימוש גם בתעשיות אלקטרוניקה וכימיה.

4. אידוי והתגבשות (Evaporation + Crystallization)

מטרת שלב זה הינן צמצום נפח הנוזלים לרמה אפסית והפיכת השפכים לפסולת מוצקה – קלה וזולה יותר לפינוי / טיפול.

בפועל, רכז מה-RO עובר לאידוי:

- חימום (Direct Heating) או אידוי מכני (MVR – Mechanical Vapor Recompression).
- לאחר מכן – קריסטליזציה: יצירת גבישים של מלחים, תחמוצות מתכת וכו' הניתנים לפינוי בקלות.

טבלה 1: שלבי מערכת ZLD

מטרה	טכנולוגיות	תוצאה	שלב
הסרת שמנים, pH, חלקיקים	מסננים, Skimmers, שיקוע כימי	הכנת מים ל-RO	טיפול מקדים
הפרדת מים ממומסים	ממברנות בלחץ גבוה	מים טהורים + רכז	RO
הפחתת מוליכות	מחליפי יונים	מים אולטרה-טהורים	DI
הוצאת שאריות מוצקות	איזוי תרמי, MVR, קריסטליזציה	פסולת גבישית	איזוי והתגבשות

מקרה בוחן - הטמעה במפעל אגמים ציפויים

חברת אגמים ציפויים בע"מ הוקמה כחברה פרטית בשנת 2006 ע"י יחיאל שלו ואמנון ממון. עם הקמתו המפעל פעל באתר בשלומי, והיום ממוקם בפארק תעשיות קורן במעלות ומתמחה בציפוי מתכות. לפני תחילת הפרוייקט, המפעל התמודד עם עלויות טיפול בפסולת נוזלית מסוכנת, וצריכת מים גבוהה. חברת צלול, המתמחה במערכות מים, נבחרה מתוך מאגר היועצים לביצוע פרויקט זה במטרה לחסוך מים, פינוי פסולת ובוצה והוצאות נוספות הנובעות מהתהליך הקיים. כמו בכל תהליך התייעלות, חיסכון סביבתי וכלכלי אחד הם.

צלול ביצעה תכנון וביצוע של מערכת ZLD וכך, כל זרמי השטיפה והחומצות מנוהלים בתוך המפעל, ללא חיבור לביו. מעבר ל- RO + DI והחלפת מי DI & RO בעיקר לשטיפות מרוכזות, עם הפחתה משמעותית במוליכות והשימוש במים. בנוסף בוצעה אופטימיזציה של אמבטי השטיפה: שטיפה ראשונית מחומצה, ואחריה שטיפה במי – RO המאפשר חיסכון בחומצה ובמים הכלליים.

תוצאות:

- צריכת מים מטופלים – תרד בכ- 90%.
- הפחתה בפינוי פסולת נוזלית מסוכנת – בכ- 67%
- הפחתה בבוצת חומ"ס לפינוי – בכ- 75%
- חסכון בחשמל לחימום מים - בכ- 50%

לקריאת מקרה הבוחן המלא: https://www.cfai.co.il/files/gallery/item/CS79_Agamim.pdf

סיכום

מערכת ZLD מציעה לתעשייה הישראלית פתרון אסטרטגי כולל להתמודדות עם אתגרי המים והשפכים – לא רק כאמצעי טכנולוגי, אלא כגישה מערכתית המטפלת בבעיה מהשורש.

יישום המערכת מאפשר חיסכון משמעותי בעלויות המים והשפכים, הפחתת סיכונים סביבתיים הקשורים לדליפות והצטברות מזהמים, והתמודדות עם האתגר המתעצם של הטמנת בוצה מסוכנת באתרים ההולכים ומתמעטים.

הייחוד של פתרון זה הוא בהתמקדות בשלב הייצור עצמו - בהפרדה מוקדמת של זרמים, במחזור מים איכותי ובמינעת יצירת השפכים מראש, ולא רק בטיפול בסוף התהליך.

מהניסיון שנצבר בארץ ובעולם, עולה כי הטמעת מערכת ZLD מביאה לא רק להפחתת ההשפעה הסביבתית של המפעל – אלא גם לשיפור תפעולי, ליציבות רגולטורית ולהחזר השקעה מהיר.

יישום מדורג, מלווה במיפוי והנדסה מותאמת, יכול להפוך את המעבר לתעשייה עם מערכות מים סגורות ויעילות מיעד סביבתי - למציאות כלכלית ותפעולית ברת השגה.

המלצות ליישום:

- תכנון הדרגתי לפי זרמים.
- שילוב בקרה וניטור לכל שלב.
- מיפוי מדויק של עומסים כימיים מראש.

המאמר נערך על בסיס הנחיות מקצועיות ונתמך בכלי ה-ChatGPT AI של OpenAI.

למקרי בוחן נוספים סקטור המתכת: <https://www.cfai.co.il/CaseStudies>