



בחינה השוואתית בין יחידות לקירור מים (צ'ילרים) בעיבוי אוויר ובעיבוי מים

- שסתום התפשטות להפחתת לחץ הנוזל והפיכתו לנוזל קר.
 - השלב הסופי במעגל הקירור - המאייד (מחליף חום קרר מים) שבו מקוררים המים על ידי הקרר. בתהליך זה מצב הצבירה של הקרר משתנה מנוזל חלקי לגז.
- עיבוי הגז מתבצע באמצעות אוויר צח אשר נשאב מהסביבה העוטפת את היחידה באמצעות מפוחים.
- יחידה זו היא יחידה עצמאית שבה כל מרכיבי המערכת נשלטים על ידי בקר, אשר מפעיל אותם בהתאם לתפוקה הנדרשת בפועל בכל רגע נתון. לדוגמה, בתפוקה חלקית יופעלו חלק ממפוחי המעבה בהתאם לתפוקת היחידה הנדרשת.

קירור מים בעיבוי מים

מערכת לקירור מים בעיבוי מים כוללת את אותם המרכיבים שבהסבר לעיל על מערכת בעיבוי אוויר (מדחס, מאייד ושסתום התפשטות), אבל ביחידה זו עיבוי הגז מבוצע על ידי מים המכונים מי עיבוי (Condense water) (איור 2).

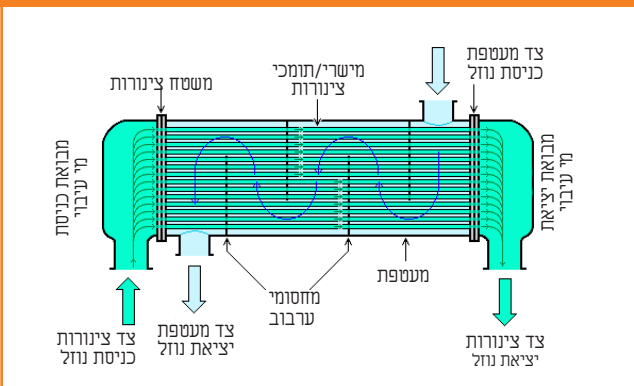
איור 2: דוגמה - יחידה לקירור מים בעיבוי מים



(מקור: גולן קור)

כמתואר באיור 3, מי העיבוי מוזרמים במעבה מסוג מחליף חום גז-מים, בתצורת קליפה וצינורות (Shell & tube). הקרר (גז) מוזרם על פני מעטפת הצינורות ומתקרר על ידי מי העיבוי שמוזרמים בצינורות.

איור 3: תהליך החלפת חום במעבה מסוג גז-מים



בסוף המאה ה-19 הומצאה מערכת הקירור הראשונה. המערכות הראשונות פותחו לצורך קירור של מבני ציבור ותעשייה, כגון בתי חולים, בתי דפוס, מרכזים פיננסיים וכדומה.

מערכות אלו התבססו על טכנולוגיה של קירור ישיר של האוויר (Direct expansion-Dx) באופן שבו מקור הקור מקרר ישירות את האוויר המוזרם לאזור המקורר.

עם התפתחות הטכנולוגיה ופיתוח מוצרי החלפת החום (Heat exchanger) החלו לייצר מערכות קירור מתקדמות שנקראו "יחידות לקירור מים". מטרתן של מערכות אלו לקרר מים המסוחרים במעגל סגור, למערכות קצה שמותקנות באזורים שונים. במערכות הקצה מבוצע מעבר החום (באמצעות מחליפי חום מקומיים) מהמים הקרים לאוויר, שמוזרם לאזור המקורר. לשיטת קירור מים מספר יתרונות על פני שיטת הקירור הישיר (Dx):

- את המים קל יותר להעביר לאזורים מרוחקים, הצנרת נוחה יותר ליישום מאחר שהיא תופסת פחות מקום.
 - למים מקדם החזק חום משופר, כלומר מים מוליכים חום טוב יותר מאשר אוויר (פחות איבוד חום לסביבה).
 - אפשר לשלוט ברמת הקירור המסופק לכל אזור בנפרד.
- מאמר זה סוקר בקצרה יחידות לקירור מים בעיבוי אוויר ויחידות לקירור מים בעיבוי מים, ומשווה ביניהן, תוך הצגת היתרונות והחסרונות של כל אחת מהמערכות.

סוגי מערכות לקירור מים (צ'ילרים)

כיום אפשר להבחין בשני סוגי מערכות עיקריים לקירור מים: מערכות בעיבוי אוויר ומערכות בעיבוי מים.

קירור מים בעיבוי אוויר

מערכת לקירור מים בעיבוי אוויר היא יחידה אחת בעלת מרכב אחד, הכוללת את המרכיבים הבאים (איור 1):

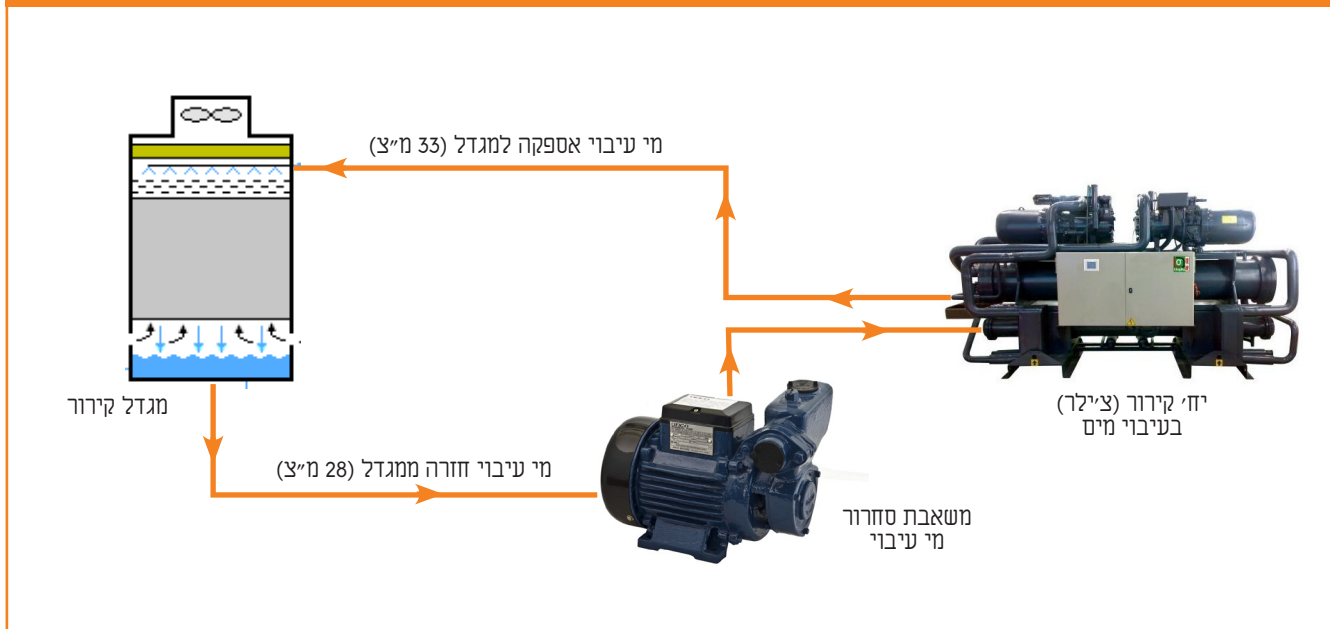
- מדחס לדחיסת הקרר (גז) ולהעלאת הלחץ.
- מעבה אוויר (מחליף חום קרר אוויר) הכולל סוללה ומפוחי אוויר. בצינורות הסוללה מוזרם הגז החם, ומפוחי האוויר מזרימים אוויר צח מהסביבה על מעטפת צינורות הסוללה. בתהליך זה מתבצע שינוי מצב הצבירה של הקרר החם לנוזל.

איור 1: דוגמה - יחידה לקירור מים בעיבוי אוויר



(מקור: גולן קור)

איור 4: תהליך קירור מי העיבוי ביחידת קירור מים בעלת עיבוי מים



כחלק ממהלך קירור מי העיבוי במגדל הקירור, מתאדים חלק ממי העיבוי. עקב כך רמת המוליכות (TDS) במים הנותרים עולה. להורדת רמת המוליכות לרמה הרצויה (בסביבות $2,000 \mu\text{s}$) יש לנקז מים ממגדל מי העיבוי, ולהוסיף מי רשת לדילול המים הקיימים. מים אלו נקראים מי תוספת (Make up water). לרוב, פעולת הניקוז מבוצעת אוטומטית על ידי מערכת שמירת מוליכות ייעודית. את המים החסרים משלימים באופן אוטומטי באמצעות ברז חשמלי, המחובר למצופף אשר תפקידו לשמור על כמות המים הרצויה. מאחר שחלק ממי העיבוי של המערך מתאדים במגדל, כמות המים הדרושה להשלמה נאמדת בעשרה ליטרים לכל טו קירור

לאחר עיבוי הגז במעבה נדרש לקרר את מי העיבוי. לשם כך נדרשים שני מרכיבים נוספים: מגדל קירור שמטרתו לקרר את מי העיבוי על ידי הזרמת אוויר צח מהסביבה, ומשאבת סחרור שבאמצעותה המים מסוחררים בין מעבה הצ'ילר למגדל הקירור. תהליך קירור מי העיבוי כולל הזרמת מי העיבוי ממעבה יחידת הקירור בטמפרטורה של כ-33 מעלות צלזיוס למגדל הקירור. המים מובלים לחלקו העליון של המגדל ומותזים דרך דיזות, שייעודן ליצור רסס לצורך החלפת חום מיטבית עם האוויר הצח שמוזרם כנגד. טיפות המים מנוקזות לתחתית המגדל בטמפרטורה של כ-29 מעלות צלזיוס, ומובלות חזרה למעבה יחידת הקירור (איור 4).

טבלה 1: דרישות יעילות אנרגטית מזערית ליחידת קירור מים חדשה

	יעילות מזערית בעומס מלא בקירור COP	יעילות מזערית מס חלקי בקירור ESEER או IPLV	תפוקת היחידה	סוג יחידה
עיבוי אוויר	3.0	3.6	עד 350 קילו וואט (להלן - קו"ט)	יחידה מקוררת אוויר עם מעבה ומדחסים מסוג "שבלול" (scroll)
	3.3	3.7	שווה או גדול מ-350 קו"ט	יחידה מקוררת אוויר עם מעבה ומדחסים מסוג בורגי (rotary screw)
	3.1	3.7	עד 350 קו"ט	
	3.3	3.7	שווה או גדול מ-350 קו"ט	יחידה עם מעבה מקורר אוויר המופעלת כיחידה אחידה לקירור או חימום מים (משאבת חום)
	2.7	3.7	עד 350 קו"ט	
	3.3	3.5	שווה או גדול מ-350 קו"ט	יחידה מקוררת אוויר בלא מעבה
עיבוי מים	4.6	אין דרישה	כל התפוקות	יחידה מקוררת מים בוכנתית
	4.9	אין דרישה	עד 350 קו"ט	יחידה מקוררת מים מסוג בורגי (rotary screw) ושבלול (scroll)
	5.4	5.5	שווה או גדול מ-350 קו"ט ועד 1055 קו"ט	
	6.0	6.2	שווה או גדול מ-1055 קו"ט	יחידה מקוררת מים צנטריפוגלית
	5.5	6	עד 528 קו"ט	
	6.1	6.5	שווה או גדול מ-528 קו"ט ועד 1,055 קו"ט	
	6.7	7	שווה או גדול מ-1,055 קו"ט	

טבלה 2: דוגמה - השוואה כלכלית בין שתי חלופות העיבוי של יחידה בעלת תפוקת קירור של 100 ט"ק, הפעילה ברציפות 24/7 בעומס ממוצע של 60%.

צילר עיבוי אוויר	צילר עיבוי מים מגדל קירור סמוך	צילר עיבוי מים מגדל קירור מרוחק	
100	100	100	תפוקה (ט"ק)
350	350	350	תפוקה (קו"ט)
111.1	69.1	69.1	צריכת חשמל (קו"ט)
3.15	5.07	5.07	מקדם יעילות (COP)
8760	8760	8760	שעות פעילות בשנה
0.6	0.6	0.6	עומס ממוצע על הצילר
583,918	363,162	363,162	סה"כ צריכת החשמל השנתית לצילר (קוט"ש)
	5.5	7.5	צריכת חשמל משאבת סחרור מי עיבוי (קו"ט)
	5.5	5.5	צריכת חשמל מפוח מגדל קירור (קו"ט)
	96,360	113,880	סה"כ צריכת החשמל השנ"ת לצידוד משלים (קוט"ש)
0.48	0.48	0.48	תעריף החשמל ממוצע (שקלים / קוט"ש)
	5,256	5,256	צריכת מים שנתית להשלמת מי מגדל (מ"ק)
	12	12	תעריף ממוצע למ"ק מים וכימיקלים (שקלים / למ"ק)
280,280	220,571	228,980	עלות צריכת חשמל שנתית (שקלים)
	63,072	63,072	עלות שנתית מים וכימיקלים (שקלים)
280,280	283,642	292,052	סה"כ עלות שנתית (שקלים)
	3,362	11,772	הפרש (שקלים)

המופק מהמערכת לדוגמה, מערכת טיפוסית בתפוקה של 100 טו קירור הפעילה ברציפות בכל ימות השנה ברמות עומס משתנות מפיקה כ-520,000 טו קירור בשנה. לשם כך תידרש כמות מי השלמה של כ-5,200 מטרים מעוקבים בשנה בעלות של עשרות אלפי שקלים בשנה.

נחיצות הטיפול במים

עם הזרמת מי התוספת מקובל להוסיף כימיקלים שונים, למניעת אבנית, חלודה וקורוזיה והיווצרות אצות. תכשירים למניעת אבנית מכילים אינהיביטורים שמונעים התגבשות גבישי אבנית, ותכשירים למניעת אצות הכוללים ביציד בריכוזים נמוכים למניעת התפתחות מיקרואורגניזמים.

הדרישה לטיפול במים אינה רק תפעולית אלא גם בריאותית. מאחר שמדובר במערכת פתוחה המסחררת מים בטמפרטורה של 35 מעלות צלזיוס

ומעלה, עלולים להתפתח חיידקי ליגיונלה שהם סכנה לבריאות. לכן הוספת החומרים לטיפול במים הכרחית ומיושמת ברוב המקומות.

קיימות שיטות נוספות לטיפול במים, כגון שימוש במרככים לריכוך מי התוספת (המכונים מים רכים) או שימוש במי RO (אוסמוזה הפוכה לסינון המים ולהפחתת המוליכות), אך שיטות אילו יקרות יותר ונפוצות בעיקר באתרים גדולים.

עלות הכימיקלים למי התוספת נאמדת ב-2.5 שקלים על כל מטר מעוקב של מי תוספת.

מה עדיף, עיבוי אוויר או עיבוי מים?

יחידות קירור מים בעיבוי מים נחשבות יעילות במיוחד ובעלות מקדם יעילות (COP) של חמש ומעלה. מנגד, מקדם היעילות של יחידות בעיבוי אוויר עומד על כ-3.15 ומעלה.

לפי תקנות מקורות אנרגיה תשע"ג 2013 להתרת יבוא של מערכות חדשות (יעילות אנרגטית מזערית ליחידת קירור מים חדשה) נקבעו ספי יעילות מינימלית ליבוא. כמוצג בטבלה 1 (מובאת מהתקנות הנ"ל), אפשר לראות שקיים הפרש ניכר ביעילות של המערכות המותרות ליבוא, בין יחידה לקירור מים בעיבוי אוויר ליחידה בעיבוי מים.

חשוב לציין שלמרות החיסכון בחשמל של היחידה עצמה

בעיבוי מים, קיימות צריכות חשמל נוספות למשאבת הסחרור ולמפוח מגדל הקירור, כך שיעילות המערכת בכללותה פוחתת. נוסף על כך, קיימות עלויות של צריכת מים וכימיקלים, כפי שתואר לעיל.

אז מה עדיף מהיבט הכלכלי?

כמקובל בשאלות מורכבות, גם במקרה זה אין תשובה חד משמעית, וכל מקרה לגופו. להלן שתי דוגמאות (טבלאות 2 ו-3) המציגות השוואה כלכלית בין שתי החלופות.

מהדוגמאות לעיל אפשר לראות שבמערכות בתפוקה נמוכה יחסית, בהתייחסות לעלות ולפסטות התפעול, המגמה נוטה לטובת השימוש במערכות בעיבוי אוויר. עם זאת, ככל שתפוקת המערכת עולה, כך גוברת כדאיות השימוש במערכות בעיבוי מים, אך הדבר תלוי במרחק מיקום מגדל הקירור מהצילר.

ככל שהמרחק רב, נדרש שימוש במשאבת סחרור גדולה יותר, ועל כן ההפרש בצריכות החשמל מצטמצם.

קיימות עוד מספר נקודות חשובות שיש להביא בחשבון, המפורטות להלן:

- בתנאי חוץ קיצוניים בטמפרטורת סביבה של יותר מ-35 מעלות צלזיוס פוחתת יעילותן של מערכות בעיבוי אוויר. ברוב אזורי ארצנו גם בחודשי הקיץ טמפרטורת החוץ הממוצעת אינה גבוהה יותר מ-32 מעלות צלזיוס. באזורים חמים, כגון אילת וים המלח, שבהם טמפרטורת החוץ בחודשי הקיץ חוצה את הסף של 45 מעלות צלזיוס, יעילות מערכות בעיבוי מים תושפע פחות לרעה.
- אם נדרשת יחידת קירור מסוג Heat Pump (משאבת חום) המספקת קירור או חימום, בטמפרטורת חוץ נמוכות של חמש מעלות צלזיוס ומטה, אי אפשר לחמם ביחידה בעיבוי מים אלא רק ביחידה בעיבוי אוויר!
- במערכות עיבוי המים אפשר לשלב רכיבי בקרה להפחתת צריכת החשמל של משאבת הסחרור או מפוח המגדל. גם באתרים שבהם אינה מותקנת מערכת בקרה מרכזית אפשר להתקין מערכת בקרה ייעודית שתפקד מקומית על רכיבים אלו.

סיכום

יחידה בעיבוי אוויר היא מערכת "מושלמת" שאינה דורשת רכיבים נוספים להפעלתה. כל שנדרש הוא לחבר ולהפעיל. יעילות המערכת מושפעת ישירות מתנאי החוץ, כך שבטמפרטורה שגבוהה מ-35 מעלות צלזיוס תפחת יעילות המערכת, בעוד שבטמפרטורות נמוכות יעילות המערכת משתפרת. יתרה מזו, התקנת היחידה מותנית במיקום שקיים בו אוורור רציף למניעת קצרי אוויר. לעומת זאת, ליחידת קירור בעיבוי מים נדרש ציוד משלים להפעלתה. נוסף על כך נדרש להתקין לה מערכת בקרה מקומית לתפעול יעיל של כל מרכיבי

טבלה 3: דוגמה - השוואה כלכלית בין שתי חלופות העיבוי של יחידה בעלת תפוקת קירור של 250 ט"ק, הפעילה ברציפות 24/7 בעומס ממוצע של 60%.

צ'ילר עיבוי מים מגדל קירור מרוחק	צ'ילר עיבוי מים מגדל קירור סמוך	צ'ילר עיבוי אוויר	
250	250	250	תפוקה (ט"ק)
875	875	875	תפוקה (קו"ט)
173.1	173.1	276.6	צריכת חשמל (קו"ט)
5.05	5.05	3.16	מקדם יעילות (COP)
8760	8760	8760	שעות פעילות בשנה
0.6	0.6	0.6	עומס ממוצע על הצ'ילר
909,992	909,992	1,453,738	סה"כ צריכת החשמל השנתית לצ'ילר (קוט"ש)
15	10		צריכת חשמל משאבת סחרור מי עיבוי (קו"ט)
10	10		צריכת חשמל מפוח מגדל קירור (קו"ט)
219,000	175,200	-	סה"כ צריכת החשמל השנתי תית לצידוד משלים (קוט"ש)
0.48	0.48	0.48	תעריף החשמל
13,140	13,140		צריכת מים שנתית להשלמת מי מגדל (מ"ק)
12	12		תעריף ממוצע למ"ק מים וכימיקלים (שקלים / למ"ק)
541,916	520,892	697,794	עלות צריכת חשמל שנתית (שקלים)
157,680	157,680	-	עלות שנתית מים וכימיקלים (שקלים)
699,596	678,572	697,7942	סה"כ עלות שנתית (שקלים)
1,802	-19,222		הפרש (שקלים)

המערכת. עם זאת, יחידה זו מושפעת פחות מתנאי חוץ קיצוניים. הפעלת יחידה זו מצריכה התעסקות רציפה במים, וטיפול במים על ידי מערכות נוספות, כגון משאבות מינון להזנת כימיקלים, מונה מים ומעקב רציף אחר הצריכות (למניעת בזבזי מים). כמו כן התקנת היחידה מותנית בהקצאת מקום למגדלי קירור.