

טכנולוגיות ייבוש אויר

נכתב ע"י:

יהושע אליזוב M.Sc.

מנהל תחום ייבוש אויר

בחברת אינסופקו
הספקה לתעשייה בע"מ

מבוא

תהליכי ייבוש של חומרים שונים ידועים מאז ימי האדם הקדמון. תהליכי ייבוש של לבני חימר, עצים, בשר, עורות ועוד ידועים זה אלפי שנים. ייבוש אוויר לעומת זאת היא טכנולוגיה צעירה יחסית שהחלה לפני כמאה שנה.

השמות הידועים ביותר בתחום הטיפול הטכנולוגי באוויר הם שמות שני מהנדסים: CARRIER מארה"ב ו-MUNTERS משבדיה.

הראשון היה החלוץ בתחום מיזוג האוויר, שפיתח את מערכת הדחיסה של גז קירור במאה הקודמת (1902). מערכת זו הייתה הבסיס לפיתוח כל ציוד מיזוג האוויר הידוע כיום. השני היה החלוץ בתחום ייבוש האוויר, שפיתח לאחר כמחצית המאה את טכנולוגיית הייבוש באמצעות גלגל מצופה בחומר סופח מים – סיליקה ג'ל (Silica gel).

מאז חלה התקדמות עצומה בתחומים אלה, הן בתחום הציוד והבקרה והן בתחום החומרים, אם כי הרעיונות הבסיסיים לא השתנו.

אנו נתמקד בתחום ייבוש האוויר ע"י חומרים סופחים. יש לזכור ששני התחומים, מיזוג האוויר וייבוש האוויר קשורים ביניהם, שכן בכל תהליכי מיזוג האוויר מתבצע גם ייבוש האוויר כפועל יוצא של קרורו אל מתחת לנקודת הטל שלו. הקשר הזה בין קירור וייבוש אוויר משמעותו, כמובן, קשר הדוק ובל ינותק בין טמפרטורת האוויר לבין הלחות שבו. האפשרות היחידה להפרדה מוחלטת בין הטיפול בטמפ' האוויר לבין הטיפול בלחות שבו, היא שימוש בטכנולוגיות ייבוש אוויר על בסיס חומרים סופחים. טכנולוגיות אלה מאפשרות ייבוש האוויר תוך חסכון משמעותי באנרגיה בהשוואה למיזוג אוויר קונבנציונלי.

חומרי ייבוש

קבוצת החומרים הסופחים בכללותה (נקראת SORBENTS), מתחלקת למספר תת-קבוצות, שהייחודיות שלהן מתבטאת ביכולתן לספוח סוג מסוים של חומרים. תת-הקבוצה של החומרים סופחי המים נקראת – DESICCANTS. תת-קבוצה זו מתחלקת לשניים:

חומרים סופחי מים מוצקים – ADSORBENTS.
חומרים סופחי מים נוזליים – ABSORBENTS.

החומרים הסופחים המוצקים מתאפיינים, בין השאר, בשטח פנים גדול מאוד – לגרם אחד של חומר סופח מוצק יש שטח פנים של מאות מטרים רבועים. להלן מספר דוגמאות אופייניות לדסיקנטים מוצקים:

- סיליקה ג'ל – חומר בעל מבנה אמורפי הנוצר מריאקציה עיבוי בין סיליקטים המסיסים במים. חומר זה, בוריאציות שונות, הוא אחד הדסיקנטים השימושיים ביותר כיום.
- פחמן פעיל – חומר אמורפי המשמש גם לספיחת גזים אחרים.
- זיאוליטים טבעיים – אלה מינרלים אלומינו-סיליקטים גבישיים הנמצאים בטבע ומצטיינים ביכולת ספיחת אדי מים.
- זיאוליטים סינתטיים – נקראים גם כברה מולקולרית (MOLECULAR SIEVE). חומרים אלה פותחו במעבדות מחקר ומחקרים למעשה את בני מינם הטבעיים.
- PSSASS - מלח נתרני של חומצה פוליסטירנסולפונית. זהו חומר פולימרי המראה פוטנציאל מבטיח מאוד כחומר סופח מים.

בקבוצת החומרים הסופחים הנוזליים נציין את השניים הבולטים ביותר:

- ליתיום כלוריד - החומר הסופח האפקטיבי ביותר והשימושי ביותר מבין הדסיקנטים הנוזליים. (משמש גם כדסיקנט מוצק בגלגלים סופחי לחות).
- טריאתילן גליקול - דסיקנט פחות אפקטיבי. מוכר גם כחומר מונע קפיאה במערכות קרור שונות.

היתרון הגדול של ליתיום כלוריד על הגליקול הוא שלחץ האדים שלו נמוך יותר. ללחץ האדים של הדסיקנט יש משמעות רבה לגבי יכולת הספיחה שלו ולגבי תפקודו בתהליך הרענון (ראה להלן).

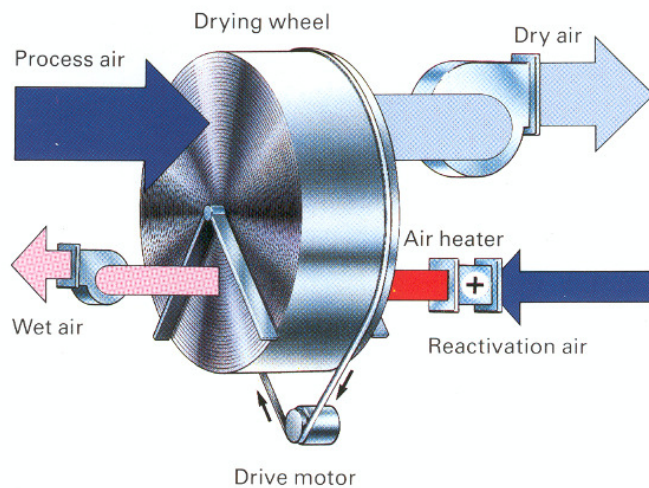
תכונות

תכונות אופיניות לכל החומרים סופחי המים:

- הידרופיליים.
- בעלי לחץ אדים נמוך מאוד.
- ניתן לרענן אותם, כלומר, ע"י השקעת אנרגיה מתאימה ניתן להוציא מהם את אדי המים שנספחו ולהחזירם למצבם המקורי.
- לחץ האדים הנמוך על-פני השטח של החומרים הסופחים, מאפשר להם לספוח אדי מים מאויר לח (בו לחץ האדים גבוה יותר באופן משמעותי) הבא איתם במגע.
- רוב הדסיקנטים מגיעים לרוויה לאחר ספיחת אדי מים בכמות של בין 20% ל- 50% ממשקלם העצמי.

תהליכי ספיחה בדסיקנט מוצק

ההסבר הפיסיקלי הפשוט ביותר לכל תהליכי ייבוש האויר הוא ההפרש בין לחץ אדי המים באויר ללחץ אדי המים על-פני הדסיקנט. (קיימים גם הסברים אחרים הקשורים בכוחות משיכה בין-מולקולריים, משיכה חשמלית ועוד, אבל לא נרחיב בהם כאן). בכדי לקבל תהליך של ייבוש אויר, לחץ אדי מים על פני הדסיקנט צריך להיות נמוך יותר מזה שבאויר שאנו רוצים לייבש. הפרש זה הוא למעשה "הכוח המניע" של כל מערכות ייבוש אויר הקיימות.



תהליך ספיחה בגלגל דסיקנטי

צד התהליך – הצד בו מתרחשת הספיחה - SORPTION:

אויר שעובר דרך הגלגל הדסיקנטי "משאיר" עליו חלק מאדי המים שבו כתוצאה מההפרשים בין לחצי האדים באויר ועל פני הדסיקנט. כתוצאה מכך האויר מתייבש ומתחמם. הסיבה העיקרית להתחממות האויר היא החלפת האנרגיה הכמוסה של אדי המים (כ- 2400 KJ לק"ג מים) באנרגיה מוחשית. כ- 80% מעליית הטמפרטורה של האויר מיוחסת להחלפה זו של אנרגיה כמוסה באנרגיה מוחשית. בנוסף לכך ישנם עוד שני גורמים להתחממות האויר כתוצאה ממעבר דרך החומר הדסיקנטי: אחד, העובדה שהתהליך אינו שווה-אנטלפיה (אינו אדיאבטי) - סיבוב הגלגל מכניס מקטע חם של הגלגל מצד הרענון לצד התהליך, דבר הגורם לתוספת אנרגיה בצד התהליך. השני הוא חום התהליך הספיחה עצמו המתרחש בין החומר הדסיקנטי לאדי המים שנספחו על פניו. מבחינה כמותית תוספת האנרגיה כתוצאה משני הגורמים הללו היא כ- 20% בלבד.

צד הרענון- הצד בו מסולקים אדי המים מהדסיקנט- REGENERATION או REACTIVATION:

בצד זה אנו צריכים להשקיע אנרגיה לצורך סילוק אדי המים שנספחו בצד התהליך. האנרגיה יכולה להיות אנרגיה חשמל, קיטור, מים חמים, סולר או גז. אוויר הרענון עובר על פני מחליף חום מתחמם לטמפ' של בין 90°C ל- 150°C (תלוי בסוג הדסיקנט) ונפגש בגלגל הדסיקנטי הרווי באדי מים. מפגש זה בין האויר החם (לחות יחסית נמוכה מאוד – אחוזים בודדים) לדסיקנט שלחץ אדי המים עליו גבוה (כתוצאה מספיחת אדי המים בצד התהליך וחימומו לטמפ' גבוהה), גורם להוצאת אדי המים מהדסיקנט וכניסתם לזרם אוויר הרענון. אוויר הרענון נפלט מהגלגל רטוב יותר וחם פחות. מקטע הגלגל שעבר רענון (למעשה ייבוש מאדי מים) ניכנס לצד התהליך מוכן למחזור ייבוש נוסף.

מערכות ייבוש אוויר

מערכות ייבוש אוויר מתחלקות לשתי קבוצות עיקריות:
מערכות המבוססות על חומרים סופחים מוצקים.
מערכות המבוססות על חומרים סופחים נוזליים.
בקבוצה שנייה לא נרחיב עקב השימוש המועט והבעיות הכרוכות ביישומה.

מערכות המבוססות על דסיקנטים מוצקים:

-מערכות עם גלגל סופח אחד.

-מערכות עם גלגל סופח + מחליף חום (סיבובי או אחר).

-מערכות עם גלגל אנטלפיה.

-הסוג הראשון הוא הסוג הנפוץ ביותר. קיים מגוון רחב של חומרים המשמשים לייצור הגלגלים עצמם – אלומיניום, נירוסטה, חומרים פלסטיים משוריינים (FRP) ועוד. השימוש במגוון חומרי המבנה לייצור הגלגלים עם מגוון חומרי הספיחה הקיימים, מביא לאין ספור שילובים אפשריים שיכולים לענות לדרישות הספציפיות של כל לקוח.

קיימות כיום מספר רב של חברות העוסקות בתחום. חברת MUNTERS - מיסודו של המהנדס השוודי הנודע- שומרת על ההובלה בתחום זה מבחינת מגוון המוצרים ונפח המכירות.

-הסוג השני, הכולל תוספת של מחליף חום אחרי הגלגל הסופח, נפוץ פחות. תוספת מחליף החום (שיכול להיות גלגל, פלטות, סוללה וכדומה) באה לפתור את הבעיה של האויר החם היוצא מהגלגל הסופח לאחר ייבושו. זה חשוב בעיקר ליישומים בתחום מיזוג אוויר לנוחות בני אדם.

-הסוג השלישי הוא גלגל האנטלפיה או גלגל השבת אנרגיה. הרעיון כאן הוא ניצול האנרגיה באויר הנפלט ממבנים. אוויר זה, שהושקעה בו אנרגיה, יכול להיות מנוצל לצורך השבתה – RECOVERY HEAT.

תהליך זה נעשה ע"י הבאת זרם האויר הנפלט מהמבנה וזרם האויר הצח המיועד להחליפו למפגש על פני גלגל מצופה בחומר סופח. שני זרמי האויר, העוברים דרך גלגל זה מחליפים ביניהם אנרגיות (אנטלפיות) בעילות של כ- 70%.

יתרונו של תהליך זה הוא שאין בו צורך בהשקעת אנרגיית רענון, משום שרענון הדסיקנט מתקבל ע"י האוויר היבש יחסית הנפלט מהמבנה.

מערכות כאלה נפוצות באיזורים בהם ישנם הפרשי אנטלפיות גבוהים בין תנאי החוץ לתנאי הפנים.

מערכות המבוססות על דסיקנטים נוזליים:

למרות הפוטנציאל התיאורטי הקיים במערכות נוזליות, לא ניתן כמעט למצוא כיום יישומים עם מערכות כאלה. המערכות הקיימות סובלות משתי בעיות עיקריות:

- הקורוזיביות הגבוהה של הליתיום כלוריד, הגורם לבעיות תחזוקה רבות.
- תופעת הסחיפה (CARRYOVER) הגורמת מעבר של ליתיום כלוריד לתעלות מיזוג האויר.

יישומים

מגוון היישומים של טכנולוגיית יבוש אויר רב מאוד. נאפיין אותם בחמש קטגוריות עיקריות:

1. יישומים בהם עומסי הלחות גבוהים בהשוואה לעומסים המוחשיים, למשל:
 - יישומי אויר צח באזורים בהם הלחות היחסית גבוהה.
2. יישומים בהם נקודת הטל הנדרשת נמוכה מהרגיל. למשל:
 - תהליכי ייצור מיוחדים (כמו ייצור סוללות ליתיום)
 - חדרי קרור
 - סופרמרקטים
 - משטחי החלקת קרח
3. יישומים בהם לחות גבוהה גורמת נזק משמעותי לתכולה הפנימית. למשל:
 - בתי מלון
 - ארכיונים, ספריות
 - מחסנים למיניהם (לתרופות, מזון, ביגוד וכו')
4. יישומים בהם יש חשיבות גבוהה ליכולת של הדסיקנטים לקטול מיקרואורגניזמים ולהקטין ע"י כך את סכנת הזיהומים הבקטריאליים. למשל:
 - בתי חולים
 - בתי מרפא שונים
 - בתי אבות
 - ייצור תרופות ומזון
 - מרכזי בריאות וספורט
5. יישומים בהם יש קשיים באספקת אנרגיה חשמלית. למשל:
 - מבנים ישנים הדורשים תוספת מיזוג אויר
 - מבנים בעלי תפוסה גבוהה הנמצאים בשימוש בתדירות נמוכה כמו- אודיטוריום, בתי כנסת וכו'.

סיכום

טכנולוגיות יבוש האויר, באמצעות דסיקנטים מוצקים ונוזליים, יושמו במשך שנים רבות בעיקר בתעשיות, כמו תעשיות מזון ותרופות, בהן יש דרישות מיוחדות ללחות נמוכות. אולם בעשור האחרון נרשמת בארצות המפותחות עלייה מרשימה של יישומים מסחריים בטכנולוגיות יבוש האויר. המניעים העיקריים לכך הם: ההבנה שטכנולוגיות אלה מתאימות ביותר לטיפול בעומסי לחות גבוהים, משפרות את איכות האויר, חוסכות אנרגיה ותורמות לאיכות הסביבה באופן ישיר ועקיף.

בישראל, מספר גדול של יועצי מיזוג אויר מובילים השתכנעו מיתרונות הטכנולוגיה ויישמו אותה בהצלחה בפרויקטים כמו בתי חולים (חדרי ניתוח, חדרי מיון, קומות אשפוז ועוד), מעבדות, אוניברסיטאות, סופרמרקטים, מרכזי ספורט, בתי אבות, משטחי החלקת קרח, מפעלי היי-טק, ועוד. במקרים רבים היתה גם הענות מצד משתמשים ויזמים שהסכימו ליישם את הטכנולוגיה לאחר שהשתכנעו מיתרונותיה..

משוואת יבוש

משוואת היבוש השימושית ביותר היא:

$$W = 1.2 * K * (G2 - G1)$$

כאשר:

- W - כמות המים המסולקים ביחידת היבוש, בק"ג לשעה.
- K - ספיקת האויר דרך יחידת היבוש, במ"ק לשעה.
- G2 – הלחות המוחלטת באויר הנכנס ליחידת היבוש, בק"ג מים לק"ג אויר יבש.
- G1 - הלחות המוחלטת באויר היוצא מיחידת היבוש, בק"ג מים לק"ג אויר יבש.
- 1.2 - משקל של מ"ק אויר בתנאים סטנדרטיים, ק"ג.

מקורות

1. Ashrae Handbook, Fundamentals 1997.
2. Ashrae Handbook, Systems and Equipment 2000.
3. Ashrae Special Publications, Desiccant Cooling and Dehumidification 1992
4. Munters' Dehumidification Handbook, 1998