

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב הפקולטה למדעי ההנדסה המחלקה להנדסת מכונות

# תהליכי מעבר חום וחומר בייבוש פנאומטי

# חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: סקורטובסקי אילריון

כסלו תשס"ג

דצמבר 2002



אוניברסיטת בן-גוריון בנגב הפקולטה למדעי ההנדסה המחלקה להנדסת מכונות

# תהליכי מעבר חום וחומר בייבוש פנאומטי

# חיבור זה מהווה חלק מהדרישות לקבלת תואר מגיסטר בהנדסה

מאת: סקורטובסקי אילריון

מנחים:

ד"ר אבי לוי

פרופ' אירנה בורדה

המחלקה להנדסת מכונות הפקולטה למדעי ההנדסה אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

חתימת המחבר	תאריך
אישור המנחים	תאריך
	תאריך
אישור יו"ר ועדת הוראה מחלקתית	תאריך

תודות.

עבודה זו הנה פרי של עבודה, אשר בוצעה במקביל לעבודתי בצבא. במהלכה נעזרתי באנשים שסייעו רבות בכל שלבי העשייה:

ברצוני להודות לד"ר אבי לוי – על הנחיתו, על הקשבה ועל הסבלנות הרבה.

לפרופ' אירנה בורדה – על התמיכה ועל שהעניקה לי מניסיונה עתיר השנים.

לאישתי היקרה, סבטלנה – על ההבנה התמיכה והאהבה. בלעדייך לא הייתי מסיים עבודה זו.

#### תקציר

ייבוש פנאומטי נפוץ בתעשיות רבות, כגון הכימית, התרופות, המזון ועוד, ועיקרו מעבר חום וחומר בין הגז החם לבין החלקיקים הלחים תוך כדי שינוע פנאומטי של החלקיקים. בעקבות הרחבת שימוש במערכות מהסוג הזה נוצר צורך במודל מתמטי מהימן על שיאפשר חיזוי תהליכים במתקנים תעשיתיים. הגישה הנפוצה ביותר לחיזוי תהליכי שיאפשר חיזוי מחליכים במתקנים ומודלים מתמטיים חד-ממדיים שמשתמשים הייבוש מושתתת על מודלים אמפיריים ומודלים מתמטיים חד-ממדיים שמשתמשים בתיאוריה אוילרית של "שני הזורמים" והם (המודלים) משמשים לחיזוי ערכים ממוצעים של תכונות הפאזות בחתך של המייבש.

בעבודה זו בניגוד למודלים החד-ממדיים המסורתיים, פותח מודל דו-ממדי המבוסס על תיאורית "שני הזורמים" ומשמש למידול תהליך ייבוש החלקיקים במייבש פנאומטי. לאחר פיתוח המודל התיאורטי פותח קוד נומרי שבעזרתו בוצע חיזוי של זרימה קבועה במייבש פנאומטי והוצגו תכונות של פאזות המשתתפות בתהליך הייבוש בכל נקודה בשדה הזרימה. במודל זה תהליך הייבוש מחולק לשני שלבים. בשלב ראשון, מתבצע אידוי של נוזל רווי מהמשטח החיצוני של החלקיק לפאזת גז, כתוצאה ממעבר החום. בשלב שני מניחים שחלקיק בנוי מליבה לחה ומעטפת מוצקה יבשה. בשלב זה תהליך ייבוש של החלקיק נשלט על ידי דיפוזיית הנוזל דרך מעטפת ועל ידי הסעת האדים לתווך גזי. במהלך האידוי הליבה הלחה מצטמקת.

לאחר פיתוח המודל התיאורטי פותח קוד נומרי שבעזרתו ניתן לחזות נומרית את תהליך הייבוש במייבש פנאומטי. הקוד הנומרי פותר את המודל התיאורטי בשיטת "נפחים סופיים" (בעבודה זו בחרנו לחלק נפח בקרה לנפחים סופיים בעלי צורה טבעתית) ונבנה בהתאם לכללים של אלגוריתם ה- SIMPLE תוך התחשבות באינטראקציות בין הפאזות בעזרת אלגוריתם ה- IPSA.

הקוד נומרי שימש לחיזוי תהליך הייבוש של חלקיקי PVC לחים במייבש פנאומטי גדול (תעשיתי) וחלקיקי חול לחים במייבש קטן (מעבדתי). תוצאות הסימולציות הנומריות הושוו לתוצאות ניסויות ולתוצאות סימולציות נומריות שפורסמו בספרות. התקבל כי קיימת התאמה בין תחזיות המודלים של (1999) Borde והנוכחי לתוצאות . Baeyens et al. (1995) ושל Rocha (1988) בשלב אחרון של העבודה נבדקה רמת ההשפעה של פרמטרים שונים על תהליך הייבוש. למשל התקבל כי חימום מוקדם של חלקיקים מאיץ תהליך הייבוש, לעומת זאת הגדלת גודל החלקיק גורמת להאטה בתהליך. על ידי שליטה בלחות הזורם המייבש ניתן לשלוט באינטנסיביות של הייבוש ובאיכות של החומר היבש.

המחקר הנוכחי מרחיב משמעותית היכולת למדל ולחזות תהליכים המתרחשים במייבש פנאומטי. המשך מחקר בתחום זה עשוי להוביל לפיתוח כלי הנדסי אשר ישרת את המהנדס העוסק בתכנון מתקן הייבוש ויאפשר לו לבנות תהליך ייבוש אופטימלי.

# תוכן העניינים

1	
1	1.1. הקדמה.
2	
2	מודלים וגישות לתיאור תהליכים במייבש פנאומטי
3	גישות לתיאור תהליכים במייבש פנאומטי
5	1.3.2. הבדל בין "זרימה דלילה" לבין "זרימה צפופה" (Dilute versus Dense)
6	.1.3.3 מודלים הידרודינמיים.
12.	1.4. מהלך המחקר
14.	2. <u>פיתוח המודל התיאורטי</u>
14.	
16.	
18.	2.3. משוואות משלימות ומשוואות המצב.
26.	3. <u>הסכימה הנומרית</u> .
26.	
26.	3.2. המודל הנומרי
27.	
28.	
30.	SIMPLE
30. 33.	אלגוריתם ה- SIMPLE
30. 33. 33.	אלגוריתם ה- SIMPLE
30. 33. 33. 34.	SIMPLE
<ol> <li>30.</li> <li>33.</li> <li>33.</li> <li>34.</li> <li>34.</li> </ol>	SIMPLE
<ol> <li>30.</li> <li>33.</li> <li>33.</li> <li>34.</li> <li>34.</li> <li>35.</li> </ol>	
<ol> <li>30.</li> <li>33.</li> <li>34.</li> <li>34.</li> <li>35.</li> <li>35.</li> </ol>	

37	4. הסימולציה הנומרית
37	
37	4.1.1. התהליך הפיזיקלי
37	
38	4.1.3. השוואה בין תוצאות הסימולציה לתוצאות ניסויות ומודלים קיימיו
44	
44	4.2.1. התהליך הפיזיקלי
44	4.2.2. השוואה בין תחזית הסימולציה הנומרית לתוצאות ניסויות
46	הפרמטרים המשפיעים על תהליך הייבוש
46	
46	virtual-mass אפקט ה- 4.3.2
49	4.4. הצגת שדה הדו-ממדי
57	

60	5. <u>סיכום, המלצות לשיפור וכוונים לעתיד</u> 5
60	
61	המלצות לשיפור וכוונים לעתיד

62
----

-	מקדם הסכימה הנומרית	а
J/kgK	קיבול חום סגולי של הגז	$C_{pg}$
J/kgK	קיבול חום סגולי של המוצק	$C_{s}$
J/kgK	קיבול חום סגולי של אדי המים	$C_{pv}$
-	מקדם הגרר	$C_d$
-	מקדם ה- virtual-mass	$C_{vm}$
m	קוטר החלקיק	$D_p$
m	קוטר של ליבה הלחה	$D_i$
$kg/(m^2s)$	מוליכות דיפוזיבית	D
m	קוטר המעטפת היבשה	$D_o$
m	קוטר המייבש	$D_{pipe}$
$m^2/s$	מקדם דיפוזיה של אדי המים באוויר	$D_{v}$
$kg/(m^2s)$	שטף מוסע	F
$N/m^3$	lpha כוח ליחידת נפח של פאזה	$F_{\alpha}$
$N/m^3$	וקטור כוח הגרר בין הפאזות	$F_{\alpha\beta}$
$m/s^2$	תאוצת גרביטציה	g
m/s	מקדם מעבר המסה	$h_{d}$
$W/m^2K$	מקדם מעבר החום	h
J/kg	lpha אנטלפיה של פאזה	$H_{\alpha}$
J/kg	אנטלפיה של אדי המים	$H_{gd}$
W/mK	מוליכות תרמית	k
kg/kmole	משקר מורקוררי שר המים	$M_{w}$
kg/kmole	משקר מורקוררי שר הגז	$M_{g}$
kg	משקל המים בחלקיק	$m_{wd}$
kg	משקל החומר המוצק בחלקיק י	$m_s$
kg/s	קצב אידוי המים מחלקיק בודד י	$\dot{m}_{d}$
m	מספר חלקיקים ביחידת נפח	$N_d$
- D	מספר נוסדט	Nu
Pa	הלחץ החלקי של אדי המים במעטפת יבשה	$p_{vo}$
Pa	ביי לחץ רוויה	$p_{sat}$
Pa	לחץ	p
-	מספר פרנטל	Pr
-	מספר פקלט	Pe
$W/m^3$	שטף חום ליחידת נפח	q
W/m <sup>2</sup>	מעבר החום בין הפאזות ליחידת נפוז	$\mathcal{Q}_{\alpha}$
J/KgK	קבוע הגז	ж

מספר רינולדס	Re
מספר שמיט	Sc
מספר שרווד	Sh
מעבר המסה ליחידת נפח	$S_m$
lpha טמפרטורה של הפאזה	$T_{\alpha}$
טמפרטורה ממוצעת $\left[\equiv 0.5 ig(\mathrm{T_s}+\mathrm{T_d}ig) ight]$	$T_{ave}$
סמפרטורת המעטפת היבשה	$T_s$
טמפרטורת דופן של המייבש	$T_{wall}$
מהירות יחסית בין הפאזות $\left[ = \left( u_g - u_d  ight)  ight]$	$u_r$
lpha מהירות הפאזה	$u_{\alpha}$
וקטור מהירות	V
נפח החלקיק	$V_{part}$
עבודה בין הפאזות ליחידת הנפח	$W_{\alpha}$
ריכוז מסי של אדי המים באוויר	$X_w$
ריכוז מולרי של אדי המים באוויר	$Y_w$
	מספר רינולדס מספר שמיט מספר שרווד מעבר המסה ליחידת נפח מעבר המסה ליחידת נפח שמפרטורה של הפאזה $\alpha$ טמפרטורה של הפאזה $\alpha$ שמפרטורת המעטפת היבשה טמפרטורת המעטפת היבשה טמפרטורת דופן של המייבש טמפרטורת דופן של המייבש מהירות הפאזה $\alpha$ וקטור מהירות נפח החלקיק עבודה בין הפאזות ליחידת הנפח ריכוז מסי של אדי המים באוויר

### סימנים יווניים

kg/ms	קצב מעבר מסה	Γ
$m^3/m^3$	נקבוביות החלקיק	Е
$m^3/m^3$	lpha שבר נפחי של פאזה $lpha$	$\phi_{lpha}$
kg/ms	צמיגות דינמית של הגז	$\mu_{g}$
kg/m <sup>3</sup>	lpha צפיפות הפאזה	$ ho_{lpha}$
kg/m <sup>3</sup>	lpha צפיפות אדי המים בפאזה	$ ho_{vlpha}$
kg/m <sup>3</sup>	צפיפות	ho
kg/kg	ריכוז המים בחלקיק	ξ
	תכונה כלשהי	arphi

## אינדקסים תחתונים

e פאזת החלקיקים	פאזת החלקיקינ	d
-----------------	---------------	---

- מייצג מעטפת "מזרחית" של נפח בקרה e
  - פאזת הגז g
- מייצג מעטפת "צפונית" של נפח בקרה n
  - מייצג מרכז, "קוטב" של נפח בקרה p
- תכונות המוצק או מייצג מעטפת "דרומית" של נפח בקרה s
- תכונות המים או מייצג מעטפת "מערבית" של נפח בקרה 🛛 w

#### פרק 1- מבוא וסקר ספרות

#### 1.1 הקדמה

תהליכי ייבוש נפוצים בתחומי פעילות רבים, כגון בתעשיה הכימית, המזון, התרופות, החקלאות וכו'. עיקרו של תהליך הייבוש הוא אידוי של נוזלים לסביבה הנגרם על ידי חימום של החומר המתיבש.

בעבודה הנוכחית נתמקד בחקר תהליך הייבוש במייבש פנאומטי. מאפיניו העיקריים: מגע ישיר בין גז מייבש לבין חלקיקים מתייבשים תוך כדי שינוע פנאומטי של החלקיקים על ידי זורם (גז חם ויבש). הגז מספק את החום הדרוש לייבוש וקולט את האדים הנפלטים מהחלקיקים. ייבוש פנאומטי הנו תהליך מהיר ויעיל בזכות תהליכי מעבר חום וחומר מהירים, אשר נובעים מכך ששטח המגע בין הפזות ומקדמי מעבר החום והמסה גדולים. מכיוון שתהליך היבוש מהיר, ניתן להבטיח (במידת הצורך) שטמפרטורת המוצק תישאר יחסית נמוכה לאורך כל התהליך. עובדה זו חשובה במיוחד בייבוש חומרים הרגישים לחום.

כאמור ייבוש פנאומטי הנו תהליך מעבר חום וחומר בין שתי פאזות, תוך שינוע פנאומטי של חלקיקים לחים עם זורם גז חם. תהליך השינוע הפנאומטי נחקר ונוצל בתעשיה עוד במאה ה-19. (Molerus (1996) ציין כי כבר ב 1847 הותקנה במפעל Peugeot בצרפת מערכת פנאומטית לשאיבה ופינוי אבק. ההתענינות הרבה בתהליך זה הובילה למחקר רחב ויסודי בתחום. קיימים מודלים מתמטיים לשינוע פנאומטי מפורטים ומהימנים, אשר הוצגו על ידי (Fan & Zhu (1998) געל ידי (נוספר בין הפאזות. אולם הם מהווים שלב חשוב בהבנה הפאזות והתמקדו בעיקר במעבר תנע בין הפאזות. אולם הם מהווים שלב חשוב בהבנה ובניתוח של תהליך ייבוש פנאומטי. מודלים רבים שפותחו עבור שינוע פנאומטי הוסבו בהמשך לייבוש פנאומטי על ידי התחשבות במעבר חום וחומר.

לאחרונה פורסמו מספר מודלים שמתארים תהליך ייבוש פנאומטי, לדוגמא לאחרונה פורסמו מספר מודלים שמתארים תהליך ייבוש פנאומטי, לדוגמא Silva & Correa (1998), Levy & Borde (1999) בפרקים הבאים. אבל, המאפין המשותף של רובם היה הניתוח החד-ממדי של הבעיה. בעבודה הנוכחית פותח מודל תיאורטי, לתיאור תהליך ייבוש פנאומטי בזרימה דו-ממדית, דלילה (dilute), אנכית ובעלת סימטריה צירית של חלקיקים לחים הנסחפים על ידי זורם חם. המודל שפותח מדמה את תהליך הייבוש הפנאומטי במיבש זה בנוי

מצינור עגול אנכי בעל שטח חתך קבוע (במידת הצורך שטח החתך ניתן לשינוי). צינור השינוע עשוי להיות מבודד תרמית או מחומם על מנת להאיץ התהליך.

## 1.2 מטרת המחקר

מטרת המחקר הינה פיתוח מודל תיאורטי לייבוש פנאומטי בזרימה דו-ממדית, אנכית, ובעלת סימטרייה צירית של זרימה דלילה (dilute flow) עם חלקיקים לחים הנסחפים על ידי הזורם החם. העבודה תכלול בניה ופתרון נומרי של המודל התיאורטי לתהליך הייבוש. לצורך אימות התחזיות של הסימולציה הנומרית, יושוו התוצאות המתקבלות לאילו הניסויות המצויות בספרות. לבסוף יוצג ניתוח פרמטרי של שדה הזרימה בתהליך הייבוש הפנאומטי.

## נאומטי במייבש פנאומטי 1.3 מודלים וגישות לתיאור תהליכים

תאור פיזיקלי ומתמטי של הזרימה ומנגנוני הייבוש מהווה שלב חשוב מאד בתיכון תהליכי הייבוש. סימולציה מקדימה, הינה כלי המאפשר למהנדס לבנות תהליך ייבוש אופטימלי. במהלך התכן על מתכנן לקבוע:

- מידות של המייבש.
- לבחור סוג וכמות אופטימלית של החומרים המשתתפים בתהליך (חומר מייבש ומתייבש).
  - כמות האנרגיה הנדרשת.
- תנאי כניסה ויציאה של החומרים (טמפרטורות, לחץ עבודה, לחות חלקיקים וגז
   וכו').

בעזרת סימולציית מחשב מהימנה ניתן להעריך את הפרמטרים המוזכרים לעיל. חשוב לציין שכל מודל מתמטי או סימולציות מחשב ראויים לשמש כלי הנדסי רק לאחר שעברו השוואה עם תוצאות שהתקבלו בניסויים ותחזיותיהם הוכחו כאמינות.

באיור 1.1 אנו רואים סכימה טיפוסית של מייבש פנאומטי אנכי ששימש בניסויו . Baeyens et al. (1995)



PVC איור 1.1 תיאור סכימתי של מייבש Baeyens et al. (1995) - ראה:

: המייבש הפנאומטי (ראה איור 1.1) בנוי בדרך כלל מ-6 חלקים עיקריים

- (1) מערכת לחימום גז (לא הכרחי, ניתן להשתמש בגזי פליטה חמים).
  - (feeder) מערכת הזנה של החומר הלח (2
  - .(מקום בו מתבצע תהליך הייבוש). צינור ייבוש
    - .(4 תא הפרדה בין החלקיקים לבין הגז
      - .(5 מערכת פינוי הגז
      - . תא איסוף לחומר היבש. (6

## נאומטי 1.3.1 גישות לתיאור תהליכים במייבש פנאומטי

באופן עקרוני קיימות שתי גישות לתיאור הזרימה הדו-פאזית במייבש הפנאומטי. הגישה הראשונה מבוססת על קורלאציות אמפיריות עבור מייבש וחומר מתייבש ספציפיים. בגישה זו מתבססים על המודלים השונים של מערכות שינוע פנאומטי ונעזרים בשלל Pan & Wypych ו- Hyber et al. (2000), Mason et al. (1998) ו- קורלאציות [ראה (1992)] להערכת מפל הלחץ בצינורות בזרימה דו-פאזית (גז וחלקיקים). בדרך כלל המודלים הנ"ל מניחים שמפל הלחץ הכולל הינו סכום של מפלי לחץ בפאזה הגזית ובפאזת החלקיקים.

 $\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_s \tag{1.2}$ 

בהצגה זו של מפל הלחץ משתמשים לרוב בתהליך עיבוד התוצאות הניסויות. במהלך הניסויים ניתן למדוד את מפל הלחץ הכולל ואילו מפל הלחץ בפאזה גזית מחשבים באמצאות קורלאציות לזרימה חד-פאזית רציפה. ההפרש בין שני מפלי הלחץ הנ"ל ייתן את מפל הלחץ הנגרם כתוצאה מנוכחות של פאזת החלקיקים. דוגמאות לגישה זאת ניתן

למצוא בעבודות של (Mason et al. (1998) ו- Pan & Wypych (1992). על מנת להעריך רטיבות החלקיקים (moisture content) ביציאה מהמייבש יש להיעזר בשתי הנחות נוספות: זרימה איזותרמית וטמפרטורת החלקיקים דומה לטמפרטורת הגז. בהתבסס על הנחות אלו ניתן לפתור משואות מאזן מסה וחום, ראה לדוגמא את העבודות של (Kemp & Oakley (1997). ו- Andrieu & Bressat (1982).

הגישה השניה מבוססת על מודלים תיאורטיים ומתמטיים לזרימה דו-פאזית ( במקרה שלנו גז- חלקיקים). באופן כללי ניתן למצוא בספרות שלוש גישות תיאורטיות בהן ניתן לתאר את הזרימה במייבש פנאומטי:

- .[Bowen (1976) , Two-Fluid Theory , ראה (1976).
  - ב. זורם גרנולרי- Eulerian Granular (1997), ב. זורם גרנולרי
- ,Discrete Element Method (Eulerian-Lagrangian)-ג. גישת האלמנט הבדיד [ראה (Cundall & Strack (1979].

תיאוריות א' ו ב' מבוססות על משוואות מאזן מסה, תנע וחום מקרוסקופיות לשתי הפאזות (חלקיקים וגז). ההנחות הבסיסיות ששתי פאזות נמצאות בו זמנית בכל נקודה בנפח בקרה, כל אחת עם השבר הנפחי (volume fraction) שלה ופאזת החלקיקים נחשבת כ-(pseudo-fluid) - זורם מדומה. ההבדל המהותי בין שתי התיאוריות הוא שתיאוריה ב' מתבססת על התיאוריה הקינטית של הגזים על מנת לתאר את התכונות המקרוסקופיות של פאזת החלקיקים (כמו טמפרטורה, לחץ, צמיגות וכו') בעוד שתיאוריה א' משתמשת בקורלאציות מקרוסקופיות כדי לחשב תכונות מקרוסקופיות של פאזת החלקיקים. נציין כי השימוש בתיאוריית שני הזורמים (Two-Fluid Theory) נפוץ יותר לתיאור זרימה דלילה בעוד שהשימוש בתיאוריה של זורם גרנולרי נפוץ יותר לתיאור זרימה צפופה.

נציין כי תיאוריית שני זורמים מתאימה גם לפתרון בעיות של זרימה דו-פאזית דחיסה ושקיימים מודלים המסוגלים להתחשב בתהליכי מעבר מסה בזרימה הנ"ל, לדוגמה Saurel & Abgrall (1999). עד כה לא נמצא תהליך ייבוש תעשיתי שמתוכנן לעבוד במשטר זרימה דחיסה, אבל באפליקציות תעופתיות תהליך בהחלט אפשרי, למשל ייבוש דלק במנוע סילון. בעבודה הנוכחית אומצה גישת שני הזורמים לתאור הזרימה הדו-פאזית במייבש.

בניגוד לגישות האוילריות (א' ו-ב') גישה ג' מתבססת על גישה אוילרית-לאגרנז'ית. גישה זו מאופיינת בכך שהגז נחשב כפאזה רציפה (קיימת בכל נקודה בנפח בקרה) וחלקיקים תופסים נקודות דיסקרטיות במרחב. כתוצאה מכך משוואות מאזן מסה, תנע וחום נפתרות לכל חלקיק בנפרד. היתרון הגדול של השיטה זו הוא שניתן לתאר סוגים שונים של אינטראקציות בין החלקיקים לגז ובין החלקיקים לעצמם. חישוב נומרי המבוסס על הגישה הזאת דורש משאבי מחשב גדולים כדי לפתור בעיות אמיתיות, שכוללות מיליונים של החלקיקים, כתוצאה מכך גישה זו עדיין לא מתאימה לפתרון בעיות בסקלות אמיתיות ובעלות גיאומטריה מורכבת.

(Dilute versus Dense) "זרימה צפופה" לבין "זרימה צפופה" (Dilute versus Dense) זרימת גז-חלקיקים נשלטת בעיקר על (Dilute), כאשר תנועת החלקיקים נשלטת בעיקר על ידי ידי כוחות גרר, לעומת זאת בזרימה "צפופה" (Dense) תנועת החלקיקים נשלטת על ידי אינטראקציות או התנגשויות בין החלקיקים (particle-particle collisions) בנוסף לכוח הגרר עם הזורם. את ההבדל העיקרי בין שני משטרי הזרימה ניתן לבטא לפי היחס בין זמן ההאצה של החלקיקים לזמן הממוצע בין התנגשויות באופן הבאה:

$$\frac{\tau_A}{\tau_c} < 1 \quad \text{for Dilute flow}$$

$$\frac{\tau_A}{\tau_c} > 1 \quad \text{for Dense flow}$$

$$(1.1)$$

כאשר  $\tau_A$ -זמן תגובה (response time) הינו הזמן הדרוש לחלקיק להאיץ ממצב מנוחה כאשר  $\tau_A$ -זמן ממוצע בין התנגשויות. ל- 63% ממהירות זרימה חופשית.  $\tau_c$  - זמן ממוצע בין התנגשויות. ההגדרה הנ"ל להפרדה בין משטרי הזרימה הוצגה על ידי (1982) Crowe לא נוחה לשימוש, מכיוון שנדרשים ניסויים על מנת לקבוע זמן תגובה וזמן ממוצע בין התנגשויות.

גישה אחרת לקביעת משטר הזרימה מבוססת על יחס נפחי בין חלקיקים לגז. כאשר היחס הנפחי של המוצק לא עולה על 5% נהוג להתיחס לזרימה כאל זרימה "דלילה" [ראה [ראה]. [Ferreira et al. (2000].

### 1.3.3 מודלים הידרודינמיים

מדענים רבים ניסו אחת מהגישות הנ"ל על מנת לחקור את תהליך הייבוש הפנאומטי. PVC אחdrieu & Bressat (1982) הציגו מודל פשוט לייבוש פנאומטי של חלקיקי PVC. המודל שלהם התבסס על מעבר מסה, תנע וחום אלמנטריים בין זורם לבין חלקיקים. על מנת לפשט המודל הם הניחו שהזרימה היא חד-ממדית, וכי מהירות יחסית בין פאזות ( $u_r$ ) מנת לפשט המודל הם הניחו שהזרימה היא חד-ממדית, וכי מהירות יחסית בין פאזות ( $u_r$ ) הינה פונקציה של כושר ציפה (buoyancy) וכח הגרר (drag force). הם הניחו כי החלקיק הינו איזותרמי ושהטמפרטורה שלו שווה לטמפרטורת האידוי. כמו כן הניחו שאידוי של מים חופשיים מתבצע בקצב קבוע. בהתבסס על הנחות הנ"ל נכתבו שש משוואות לשישה נעלמים: המהירות היחסית בין הפאזות ( $u_r$ ), לחות האוויר, תכולת המים בחלקיק (j), לחות בשיווי משקל והטמפרטורות של החלקיקים ושל הזורם. התאמה טובה התקבלה בין תחזיות הפתרון הנומרי של המודל לבין התוצאות הניסויות של אותם

Tanthapanichakoon & Srivotanai (1996) הציגו מודל דומה. בעבודה זאת הושוו תחזיות המודל הנומרי לתוצאות ניסויות של אותם החוקרים, אך לא התקבלה התאמה טובה בין התוצאות החישוב לבין תוצאות הניסוי.

Mindziul & Kmiec (1996,1997) ו- Kmiec (1997) אביגו מספר עבודות, בהן התמקדו בחקר תופעות בשדה המהירויות בזרימה גז-חלקיקים במייבש פנאומטי. המודל התיאורטי שהציגו התבסס על משוואות רציפות נפרדות עבור שתי פאזות (גז וחלקיקים) ואילו משוואות מאזן תנע נכתבו עבור פאזת חלקיקים ותערובת גז-חלקיקים. מודל זה התעלם מתופעות מעבר חום וחומר. נציין כי למרות שהמייבש היה בנוי משלושה אלמנטים עם גיאומטרית חתך שונה, הבעיה נפתרה כבעיה חד- ממדית. בעבודה זו נבדקה השפעתן של קורלאציות שונות של מקדם החיכוך בין החלקיקים לדופן. תוצאות הסימולציה הנומרית הושוו לתוצאות ניסויות והוצגה מידת ההשפעה של מקדם החיכוך על מפל הלחץ במייבש, מהירויות של שתי הפאזות וזמן השהיה של החלקיקים במייבש.

Alvarez & Blasco (1999 a,b) התבוננו בתהליכי ייבוש של קמח דגים וסויה. המודל הניח זרימה התיאורטי, שפתחו החוקרים, כלל משוואות מאזן מסה, תנע וחום. המודל הניח זרימה דלילה של חלקיקים הומוגניים בעלי צורה זהה וכי הגז השחון, שמוביל החלקיקים, מתנהג כגז אידאלי. כמו כן הוזנח השלב ההתחלתי בו עשוי להתרחש עיבוי מים על פני חלקיקים. כגז אידאלי. כמו כן הוזנח השלב ההתחלתי בו עשוי להתרחש עיבוי מים על פני חלקיקים. החוקרים השתמשו ב- film theory [Bird (1960) על מנת להתחשב בהשפעת מעבר המסה על מקדם מעבר החום. בעבודה זו הוצגה התאמה טובה בין תוצאות ניסויות של אותם החוקרים לבין סימולציה נומרית המבוססת על מודל הנ"ל.

Kemp et al. (1994) הציגו מודל תיאורטי לזרימת חלקיקים, מעבר חום וחומר במייבש פנאומטי אנכי ועגול. המודל היה חד-ממדי והתחשב באינטראקציות חלקיקים-דופן. השפעת צורת החלקיק על כח הגרר והאפקט הצטברות (agglomeration) של החלקיקים בכניסה למייבש נלקחו בחשבון. התיחסות לזרימה היתה כעל זרימה מפותחת לאורך כל המייבש.

Kemp & Oakley (1997) הרחיבו את המודל ויישמו אותו עבור מייבש רב שלבי. משוואות המתארות את תנועת החלקיקים, מעבר חום וחומר, מאזני חום וחומר ותכונות מקומיות של הגז נפתרו בו זמנית עבור קטע חד-ממדי קטן. על ידי שימוש בקורלאציות מקומיות של הגז נפתרו בו זמנית עבור קטע חד-ממדי קטן. על ידי שימוש בקורלאציות Ranz/Marshal למעבר החום, עם השינוי של Weber, נערך אומדן מינימלי (underestimation) של תכולת המים בחלקיק (moisture content). תופעה דומה התגלתה בעבודה של Levy & Borde (1999) ו- Baeyens et al. (1995). מכיוון שקורלאציית מעבר חום נועדה עבור חלקיק בודד, לא פלא שקירבת החלקיקים האחרים הפחיתה את קצבי מעבר החום והחומר. על מנת לשפר התאמה בין סימולציה נומרית לבין תוצאות ניסויות (1997) Kemp & Oakle (1997) את תחזיותיהם הנומריות לתוצאות ניסויות.

Silva & Correa (1998) השתמשו בתוכנת DryPak כדי לבצע סימולציה לתהליך Silva & Correa (1998) ייבוש חול במייבש פנאומטי. הסימולציה נבדקה מול תוצאות ניסויות ושני המודלים של ייבוש חול במייבש פנאומטי. הסימולציה נבדקה מול תוצאות ניסויות ושני המודלים של Rocha (1988) הסבר מפורט על DryPak, המודלים של Rocha (1988) בניהם יוצגו בהמשך.

המודלים של (Rocha (1988: ההבדל המהותי בין שני המודלים מתייחס לאופן הצגת משוואת שימור תנע. במודל הראשון- (מודל א'), משוואת שימור התנע נרשמה עבור תערובת של זורם וחלקיקים. לעומת זאת במודל השני- (מודל ב') משוואות שימור התנע

נרשמו עבור כל פאזה בנפרד. שני המודלים מתבססים על הנחות יסוד הבאות: זרימה חד-ממדית קבועה, חלקיקים כדוריים ולא סופגים (non hygroscopic), החלקיק לא משנה צורתו (לא מצטמק) בתהליך הייבוש, התכונות והגאומטריה קבועות בחתך הזרימה, העבודה בין הפאזות- זניחה. בהתבסס על הנחות הנ"ל נרשמו משוואות מאזן מסה, תנע ואנרגיה עבור התערובת ועבור פאזת חלקיקים. קורלאציה של Ranz/Marshal היוותה בסיס לחישוב מקדמי מעבר חום וחומר. למרות שבמודלים הנ"ל הוזכר נושא מעבר חום מהפאזה הגזית לסביבה, לא הוצג מודל מתמטי המתאר תהליך זה.

מודל DryPak: כל הנחות היסוד שהניח (1988) Rocha תקפות במודל DryPak, אך בנוסף הונחו תנאיי זרימה אדיאבטיים (ללא חילוף חום עם הסביבה). הבדלים נוספים בין המודלים היו בגישה לחישוב מקדמים ושטחים למעבר חום וחומר. DryPak משתמש במשוואת DryPak לחישוב מקדמים ושטחים למעבר חום וחומר. אנלוגיות בין במשוואת Frossling לחישוב מספר נוסלט (Nu). הוצגו סוגים שונים של אנלוגיות בין מעבר החום והחומר ויושם התיקון של Ackerman על מנת להתחשב בהשפעת מעבר מסה על מקדם מעבר חום והחומר ויושם התיקון של DryPak על מנת להתחשב בהשפעת מעבר מסה על מקדם מעבר חום. יש לציין כי בהבדל מהמודלים של (1988), מודל מסה על מקדם מעבר חום. יש לציין כי בהבדל מהמודלים של (shrinkage), התנגדות פנימית מסה על מקדם מעבר חום וחומר. כמו כן ניתן לקבל פילוג של תכולת המים בתוך החלקיק. DryPak Silva and על מעבר חום וחומר. כמו כן ניתן לקבל פילוג של תכולת המים בתוך החלקיק. DryPak Silva and נו998) מציגות המתבססות על מציגות הנומריות של מציגות המתבססות על מציגות הנומריות של מציגות התאמה טובה יותר לתוצאות הניסוי מאשר תוצאות הסימולציות הנומריות של Rocha (1988).

Levy & Borde (1999) אימצו את תיאוריית שני הזורמים כבסיס לבניית מודל של זרימת חלקיקים דרך המייבש הפנאומטי. הם הניחו פתרון חד- ממדי וקבוע בזמן. על בסיס המודל המתמטי בוצעו סימולציות נומריות של ייבוש חלקיקי PVC לחים במייבש ארוך וייבוש של חול לח במייבש קטן (מעבדתי). במודל זה תהליך הייבוש מחולק לשני שלבים. בשלב ראשון, מתבצע אידוי נוזל רווי מהמשטח החיצוני של החלקיק לפאזת גז, כתוצאה ממעבר חום. בשלב שני מניחים שהחלקיק בנוי מליבה לחה ומעטפת מוצקה יבשה, בעלת קוטר חיצוני קבוע. תהליך הייבוש של החלקיק נשלט על ידי דיפוזיית הנוזל דרך המעטפת ועל ידי הסעת האדים לתווך גזי. במהלך האידוי הליבה הלחה מצטמקת (shrink). איור

Levy & Borde (1999) מציג את המודל הייבוש של החלקיק, כפי שתואר על ידי (ערך נמוד, שנקבעה מראש או תהליך הייבוש נגמר כאשר תכולת הנוזל בחלקיק יורדת לערך נמוך, שנקבעה מראש או Levy & Borde כאשר החלקיק עוזב את המייבש. תוצאות הסימולציה הנומרית של



איור במהלך הייבוש 1.2 שינוי קוטר החלקיק ותכולת מים בתוכו במהלך הייבוש 1.2 שינוי קוטר החלקיק ותכולת מים בתוכו במהלך הייבוש

(1999) הושוו לתחזיות מודלים נומריים של Rocha ו-Rocha שאותם הציגו Levy & Borde (1999) של Silva & Correa (1998). תוצאות הסימולציה של (1998) Rocha (1988). קרובות יותר לתוצאות החיזוי של DryPak מאשר לתוצאות החיזוי של (1988) Rocha (1988). קרובות יותר לתוצאות החיזוי של מתמטי פסאודו דו- ממדי למייבש פנאומטי אנכי. המודל התבסס על תיאוריית שני הזורמים. המודל התחשב פילוגים ציריים ורדיאליים של המודל התבסס על תיאוריית שני הזורמים. המודל התחשב פילוגים ציריים ורדיאליים של מהירויות הגז והחלקיקים, תכולת המים בחלקיק, יחס נפחי של הפאזות, טמפרטורות ולחץ. המודל נפתר נומרית, מבוסס שיטה של הפרשים סופיים. המודל לא נבדק כנגד תוצאות ניסויות.

Silva & Nebra (1997) אל ייבוש Silva & Nebra (1997) בציקלון. מודל זה התחשב בתופעות של החלקת חלקיקים בדופן, מעבר חום בין חלקיקים בציקלון. מודל זה התחשב בתופעות של החלקת חלקיקים בדופן, מעבר חום בין חלקיקים לדופן והצטמקות של החלקיקים תוך כדי הייבוש. המודל נבנה עבור זרימת גז-חלקיקים (axisymmetric) קבועה בזמן, לא דחיסה, דו-ממדית, בעלת סימטרייה צירית (anitymmetric) וטורבולנטית. כוח הכבידה הפועל על החלקיקים הוזנח. המודל הניח שצורת החלקיקים הינה כיות הינה כיות גז-חלקיקים (מנוצריה בזמן, לא דחיסה, דו-ממדית, בעלת סימטרייה בירית (axisymmetric) המודל המודל הניח שצורת החלקיקים היטורבולנטית. כוח הכבידה הפועל על החלקיקים הוזנח. המודל הניח שצורת החלקיקים הינה כדורית והם מפוזרים בשכבה בעלת ריכוז הומוגני על דופן הציקלון ואילו במרכז הינה כדורית המודל התבססה על הציקלון ריכוזם של החלקיקים נמוך מאד. הסכימה הנומרית לפתרון המודל התבססה על אלגוריתם SIMPLE (ראה (1980) בארכז).



איור 1.3 סימולציה של תהליכים עיקריים במייבש פנאומטי Pelegrina & Crapiste (2001):ראה:

תוצאות הטימולציה הנומרית לבין תוצאות הטימולציה הנומרית לבין תוצאות Silva & Nebra (1997) הניסויים וטענו שהגורמים המשפיעים ביותר על מהימנות הסימולציה היו תנאי החלקה של החלקיקים בדופן והצטמקות החומר במהלך הייבוש.

Pelegrina & Crapiste (2001) ביצעו סימולציה נומרית, חד- ממדית של ייבוש פרורי תפוח אדמה במייבש פנאומטי. המודל המתמטי התבסס על תיאוריית שני הזורמים בדומה לזה שהוצג על יד (Levy & Borde (1999). בעבודה זו הוצג גרף המאפין תהליכים עיקריים במייבש פנאומטי (ראה איור 1.3) באיור זה קו רציף מתאר את התכונות של פאזת החלקיקים ואילו קו מקווקו מתייחס לפאזת הגז. הסימון בסוגריים תואם סימון המקובל בעבודה הנוכחית.

Fyhr & Rasmuson (1997a,b) המודלים של לעיל, המודלים של Cartaxo & Rocha (1999) ו-ו- Cartaxo & Rocha (1999) השתמשו בגישה אוילרית- לאגרנג'ית, בה גז נתפס כפאזה רציפה ואילו חלקיקים מוצקים מצוים בנקודות דיסקרטיות בנפח בקרה. כתוצאה מכך משוואות מאזן מסה, תנע ואנרגיה נפתרו עבור כל חלקיק וחלקיק בתוך נפח בקרה. מכך משוואות מאזן מסה, תנע ואנרגיה נפתרו עבור כל חלקיק וחלקיק בתוך נפח בקרה. (1997b) הציגו מודל דו-ממדי לייבוש של שבבי עץ באמצעות קיטור שחון. הזרימה תוארה כזרימה דו-ממדית (בעלת פילוגים בחתך הזרימה) וקבועה משוואות התנועה ותהליך הייבוש נפתרו עבור כל חלקיק וחלקיק בצורה איטרטיבית.



המודל לא לקח בחשבון אינטראקציות בין החלקיקים. תנועה לא סדירה ושונות בצורת החלקיקים של שבבי העץ קבלו ביטוי בחישוב מקדמי גרר ומעבר חום. תחזיות הסימולציה הנומרית השיגו התאמה טובה לתוצאות הניסויות עבור פילוגי לחץ, טמפרטורה והלחות הסופית של שבבי העץ. לאחר שהוכח שהמודל אמין, בוצעה אנליזה פרמטרית, באמצעותה נבדקה השפעתם של גורמים שונים על תהליך הייבוש. מאנליזה זו התקבל כי ההתנגדות הפנימית למעבר מסה הינו הגורם הדומיננטי בייבוש שבבים בעלי פורוזיביות קטנה. ככל שגודל החלקיק גדל כך קטן קצב מעבר החום ונדרש יותר זמן לייבוש החלקיק, ראה איור 1.4. בעקבות זאת הגיעו החוקרים למסקנה ששבבים גדולים או בעלי פורוזיביות קטנה צריכים מייבש ארוך יותר בכדי להגיע לדרגת הייבוש הרצויה. באיורים 1.5 ו-1.6 רואים שהגדלת מקדם מעבר חום וחימום מוקדם מאיצים תהליך הייבוש. מעבודתם שלגדלת מקדם מעבר חום וחימום אשר מוקדם מאיצים תהליך הייבוש. מעבודתם של סוג הזורם על תהליך של סוג הזורם על הליך הייבוש, ראה הייבוש, ניתן להסיג שבחירת אוויר בתור הזורם המייבש מאיצה את תהליך הייבוש, ראה איור 1.7.

.Cartaxo & Rocha (2001,1999) מודל דו-ממדי לתאור זרימה במייבש פותח על ידי (Cartaxo & Rocha (2001,1999) בעבודה זו הם התמקדו בתהליך השינוע הפנאומטי. תהליכי מעבר חום ומסה לא נלקחו בחשבון, למרות שהם הצביעו על האפשרות של הרחבת המודל לצורך חיזוי תהליכי מעבר חום וחומר. בעבודה זו הוצגה השפעת מעבר התנע בין פאזת החלקיקים לפאזת הגז על חום וחומר. בעבודה זו הוצגה השפעת מעבר התנע בין פאזת החלקיקים לפאזת הגז על פילוג מהירות הגז בחתך הזרימה ופילוג ריכוזים של החלקיקים. המודל הנומרי פותח במטרה לחזות שינוע של חלקיקים כדוריים גדולים בצינור אנכי ארוך. פילוג המהירויות, המנורמלות לפי מהירות מירבית של הגז, בחתך של הזרימה המפותחת כפי שהתקבל המנורמלות לפי מהירות מירבית של הגז, בחתך של הזרימה המפותחת כפי שהתקבל המנורמלות לפי מהירות מירבית של הגז, בחתך של הזרימה המפותחת כפי שהתקבל מנורמלות הפאזה הגזית על דופן הצינור שווה לאפס.



איור בחתך הזרימה 1.8 פילוג מהירויות בחתך הזרימה (2001) Cartaxo & Rocha

## 1.4 מהלך המחקר

במחקר הנוכחי פותח מודל דו-ממדי המבוסס על תיאורית "שני הזורמים" ומשמש לתיאור תהליך ייבוש חלקיקים במייבש פנאומטי (מוצג בפרק 2). במודל זה תהליך הייבוש מחולק לשני שלבים. בשלב ראשון, מתבצע אידוי של נוזל רווי מהמשטח החיצוני של החלקיק לפאזת גז, כתוצאה ממעבר החום. בשלב שני מניחים שחלקיק בנוי מליבה לחה ומעטפת מוצקה יבשה. בשלב זה תהליך ייבוש של החלקיק נשלט על ידי דיפוזיית הנוזל דרך

המעטפת ועל ידי הסעת האדים לתווך גזי. במהלך האידוי הליבה הלחה מצטמקת. לאחר פיתוח המודל התיאורטי פותח קוד נומרי (מוצג בפרק 3) שבעזרתו בוצע חיזוי של תהליך הייבוש במייבש פנאומטי. בספרות ניתן למצוא מספר רב של שיטות לפתרון בעיות Wang & Crawford (1997) ,Patankar (1980) ,Patankar (1980) שמשלבות דיפוזיה והסעה, למשל (1997) Tisej & Petelin (1997), Coquel et al. (1997) Patankar אחרים. בעבודה זו הוחלט להשתמש באלגוריתם ה- SIMPLE של SIMPLE של (1980). (1980).

מרחב החישוב חולק למספר סופי של נפחי בקרה (finite volume method). אינטגרציה של משוואות השימור במרחב החישוב נעשתה באמצאות שיטה הידועה בשם: (TDMA). המשוואות הדיסקרטיות נפתרו על ידי (TDMA)-(Versteeg & Malalasekera (1998) [ראה Versteeg & Malalasekera (1998)]. בכדי להתחשב בצימוד במשוואות השימור בין הפאזות, השתמשנו ב- (IPSA). בכדי להתחשב בצימוד במשוואות השימור בין הפאזות, השתמשנו ב- (Spalding (1983)].

PVC תחזיות הסימולציות הנומריות אומתו עם תוצאות ניסויות עבור ייבוש חלקיקי וחלקיקי חול. לבסוף בוצע מחקר פרמטרי, אשר בחן את השפעתם של הפרמטרים השונים על תהליך הייבוש (מוצג בפרק 4).

## פרק 2 – פיתוח המודל התאורטי

בפרק זה יתואר המודל התיאורטי, המבוסס על התיאוריה האוילרית של "שני זורמים" (dilute) לתואר המתקבל בזרימה דלילה (Two-Fluid Theory), שנבחר לתאור שדה הזרימה המתקבל בזרימה דלילה של חלקיקים לחים הנסחפים ע"י גז חם בתוך מייבש פנאומטי. תהליך הייבוש מתחלק לשני שלבים:

א- אידוי של אדי המים מפני שכבה חיצונית של החלקיק.

ב- דיפוזיה של אדי המים דרך קליפה יבשה על תוך הפזה הגזית, בנוסף הנחנו כי במהלך אידוי המים הליבה הלחה מצטמקת ועובי הקליפה היבשה גדל.

תהליך הייבוש מסתיים בשני מצבים:

א. כמות המים בתוך החלקיק יורדת לרמה זניחה.

ב. החלקיק עוזב את המייבש.

## 2.1 תיאוריה והנחות יסוד

## הנחות היסוד לזרימה דו-פאזית עם מעבר חום וחומר

- (Two-Fluid Theory) פאזת החלקיקים מתנהגת כפאזה רציפה, 1
- .2. האינטראקציה בין החלקיקים לבין הדופן ובין החלקיקים לעצמם זניחה.
  - . הפאזה הגזית הינה תערובת של אוויר ואדי מים.



(Pneumatic dryer) איור סכימת מייבש פנאומטי- אנכי 2.1

 $) + (r_{\alpha}P_{\alpha}\varphi_{\alpha}) - \pm S_{m}$ 

<u>משוואת מאזן תנע לפאזה α</u>

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{V}_{\alpha}) + \nabla \bullet [\vec{V}_{\alpha} \bullet \vec{V}_{\alpha} \rho_{\alpha} \phi_{\alpha}] = -\nabla \bullet [\phi_{\alpha} \vec{\tau}_{\alpha}] - \phi_{\alpha} \nabla \bullet (P_{\alpha}) + \phi_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{g} + \vec{F}_{\alpha\beta} \pm S_{m} \vec{V}_{d}$$

$$(2.2)$$

<u>מאזן אנרגיה לפאזה α</u>

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi_{\alpha} \rho_{\alpha} \left( H_{\alpha} + \frac{u_{\alpha}^{2}}{2} \right) \right] + \nabla \bullet \left[ \phi_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{V}_{\alpha} \left( H_{\alpha} + \frac{u_{\alpha}^{2}}{2} \right) \right] = -\left( \nabla \bullet \vec{q} \right) - \rho_{\alpha} \phi_{\alpha} \left( \vec{V}_{\alpha} \bullet \vec{g} \right) - \nabla \bullet \left[ \phi_{\alpha} \vec{\tau}_{\alpha} \bullet \vec{V}_{\alpha} \right] + Q_{gd} - W_{gd} \pm S_{m} \left( H_{gd} + \frac{u_{d}^{2}}{2} \right)$$
(2.3)

## משוואת דיפוזיה של אדי מים בפאזה גזית:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \phi_g \rho_g X_w \right) + \nabla \bullet \left( \phi_g \rho_g \vec{V}_g X_w \right) = -\nabla \bullet \left( D_g \rho_g \phi_g \nabla X_w \right) + Sm$$
(2.4)

בהתבסס על ההנחות שהוצגו עד כאן, משוואות השימור 2.1-2.4 מתארות את שדה הזרימה המתפתח במייבש פנאומטי. על מנת לפתור את המודל המתמטי חסרים עוד מספר משוואות מצב, משוואות נוספות לתאור הקשרים בין התכונות ולהערכת מקדמי המעבר. לשם כתיבת המשוואות המשלימות נעזר בהנחות יסוד נוספות.

## הנחות יסוד למייבש פנאומטי אקסיסימטרי (המשך).

- . הזרימה במייבש הינה אנכית, דו- ממדית, אי רוטציונית ובעלת סימטריה צירית.
  - .5. על דופן המייבש מתקיימים תנאי אי החלקה ואי חדירה לפאזת הגז.
    - .6 הגז מתנהג כגז אידיאלי.
    - .7 זרימה קבועה בזמן (steady state).
    - . חילוף חום עם הדופן אפשרי רק לפאזה גזית.
    - .9 החלקיקים בנויים ממוצק נקבובי ונוזל או אדי נוזל רווים.
- דעלב שני של הייבוש.10.בשלב ראשון של הייבוש החלקיק הנו איזותרמי ואילו בשלב שני של הייבוש. טמפרטורת הקליפה (מעטפת החלקיק) שונה מטמפרטורה במרכז החלקיק.

- .11. הצפיפויות של הנוזל והמוצק המרכיבים את החלקיק קבועים.
  - .12 השפעת כוח הכובד על פאזת גז זניחה.
- .13. השפעה של כוחות אלקטרומגנטיות, קרינה ומתח פנים זניחה.

#### 2.2 משוואות המאזן

בסעיף זה תוצגנה משוואות המאזן 2.1-2.4 עבור פאזת גז והחלקיקים במערכת קואורדינטות גלילית (ראה איור 2.1), בעלת סימטריה צירית.

5-14 בהתבסס על הנחה 7, שהזרימה קבוע בזמן מתקיים:  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ . בהסתמך על הנחות 4 ו $V = u_z(z,r)$  בהסתמך (z) בלבד: (z) וקטור המהירות של הגז והחלקיקים הינו בעל רכיב צירי

#### <u>משוואות שימור המסה לפאזה α</u>

בהתבסס על הנחות יסוד אלו משוואות שימור המסה לפאזה lpha נרשמה באופן הבא:

$$\frac{\partial(\rho_{\alpha}u_{\alpha}\phi_{\alpha})}{\partial z} = S_m \tag{2.5}$$

:כאשר השבר הנפחי של הפאזה lpha מוגדר על ידי

$$\phi_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{V}$$
-Volume fraction (2.6)

**T**7

#### משוואות מאזן תנע:

מכיוון שזרימה הינה דלילה ואין אינטראקציה בין החלקיקים ומכיוון שהשטח האפקטיבי בו פועל הלחץ על החלקיק זניח יחסית לזה של הגז, איבר מפל הלחץ ירשם רק במשוואת מאזן תנע בפאזה גזית.

#### מאזן התנע לפאזה הגזית:

( $V_r$ ) המהירות הרדיאלית (7, ו-7) המהירות הרדיאלית (הנחות יסוד 4, 5, ג-7) המהירות הרדיאלית בהסתמך על הנחות שהוצגו לעיל (הנחות שאין מהירות יחסית בין הפאזות בכיוונים אילו הזויתית ( $V_{\theta}$ ) של פאזת הגז זניחה ומכיוון שאין מהירות יחסית בין הפאזות בכיוונים אילו  $F_r = F_{\theta} = 0$ 

$$rac{\partial P}{\partial r}=rac{\partial P}{\partial heta}=0$$
 -ל  $heta$  ו-  $heta$  ו-  $r$  כתוצאה מכך מתנוונות משוואות התנע בכיוונים

לאחר צמצום איברים מתקבל:

$$\frac{\partial(\rho_g u_g^2 \phi_g)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\phi_g \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial r}\right)\right] + F_g + S_m u_d + \frac{\partial}{\partial z}\left(\phi_g \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial z}\right)$$
(2.7)

<u>מאזן התנע לפאזת החלקיקים:</u>

$$\frac{\partial(\rho_d u_d^2 \phi_d)}{\partial z} = -\rho_d g \phi_d + F_d - S_m u_d$$
(2.8)

<u>משוואות מאזן אנרגיה :</u>

משוואת מאזן אנרגיה לפאזת הגז:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \phi_g \rho_g u_g \left( H_g + \frac{u_g^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \phi_g k_g r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \phi_g k_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) + Q_g - W_g + S_m \left( H_{gd} + \frac{u_d^2}{2} \right)$$

$$(2.9)$$

בהנחה שמעבר חום בהולכה בכיוון z זניח ביחס למעבר חום בהסעה ניתן לרשום את משוואה (2.9) באופן הבא:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \phi_g \rho_g u_g \left( H_g + \frac{u_g^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \phi_g k_g r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + Q_g - W_g + S_m \left( H_{gd} + \frac{u_d^2}{2} \right)$$
(2.10)

## משוואת מאזן אנרגיה לפאזת החלקיקים:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \phi_d \rho_d u_d \left( H_d + \frac{u_d^2}{2} \right) \right] =$$

$$= Q_d - W_d - \rho_d u_d \phi_d g - S_m \left( H_{gd} + \frac{u_d^2}{2} \right)$$
(2.11)

נציין כי קיימות מספר צורות להצגת משוואת שימור אנרגיה, ראה (Bird (1960). בעבודה זו הוחלט לכתוב את משוואת מאזן אנרגיה עבור פאזת חלקיקים במונחים של אנטלפיה.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \phi_d \rho_d u_d c_s T_d \right] = Q_d - S_m H_{gd} \tag{2.12}$$

## 2.3 משוואות משלימות ומשוואות המצב

הנפח הכלי מחולק בין שתי פאזות:

- $V = V_g + V_d$  (2.13) השבר הנפחי של פאזת הגז מוגדר על ידי:
- $\phi_g = \frac{V_g}{V} \tag{2.14}$

השבר הנפחי של פאזת החלקיקים מוגדר על ידי:

 $\phi_d = \frac{V_d}{V}$ (2.15)
::

$$\phi_g + \phi_d = 1 \tag{2.16}$$

## (Interphase Drag Forces) כוחות גרר בין הפאזות

אינטראקצית התנע בין הפאזות המשתתפות בתהליך כוללת את כוח הגרר (ביטוי ראשון באנטראקצית התנע בין הפאזות המשתתפות בתהליך ביטוי שני באגף ימין, ומבוטאת באגף ימין) ואפקט של המסה הנוספת (virtual-mass) - ביטוי שני באגף ימין : על ידי

$$F_{d} = -F_{g} = N_{d}\rho_{g} \left[ C_{d} \frac{\pi D_{p}^{2}}{4} \frac{1}{2} u_{r} \left| u_{r} \right| + c_{vm} \frac{\pi D_{p}^{3}}{6} u_{d} \frac{du_{r}}{dz} \right]$$
(2.17)

כמות החלקיקים ביחידת נפח, N<sub>d</sub>, ניתנת לחישוב על ידי:

 $N_d = \frac{6\phi_d}{\pi D_p^3} \tag{2.18}$ 

:כ: מוגדרת היחסית,  $u_r$  ומהירות ומהירות

$$u_r = u_g - u_d \tag{2.19}$$

את תרומת האפקט של ה- virtual-mass מתארים באמצעות מקדם  $C_{vm}$ . בדרך כלל, המקדם הנ"ל הנו פונקציה של השבר הנפחי של פאזת החלקיקים וצורת החלקיק, אבל המקדם הנ"ל הנו פונקציה של השבר הנפחי של פאזת החלקיקים כדוריים מוצקים לרוב מתייחסים אליו כקבוע. (1987) Clift et al. (1987) ציין שעבור חלקיקים כדוריים מוצקים  $C_{vm} = 0.5$ . כווft et al. ( $C_{vm} = 0.5$ ) ניתן למצוא ב- Clift et al. (Dssen, Ritter et al.) עבור מספרי רינולדס שונים (Cssen, Ritter et al.)

 $C_{d} = \frac{64}{\pi \operatorname{Re}} \left( 1 + \frac{\operatorname{Re}}{2\pi} \right) \text{ for } \operatorname{Re} < 0.01$   $C_{d} = \frac{64}{\pi \operatorname{Re}} \left( 1 + 10^{x} \right) \text{ for } 0.01 < \operatorname{Re} < 1.5$   $x = -0883 + 0.906Lg \left( \operatorname{Re} \right) - 0.025 \left( Lg \left( \operatorname{Re} \right) \right)^{2}$   $C_{d} = \frac{64}{\pi \operatorname{Re}} \left( 1 + 0.138 \operatorname{Re}^{0.792} \right) \text{ for } 1.5 < \operatorname{Re} < 133$   $Lg \left( C_{d} \right) = 2.0351 - 1.66Lg \left( \operatorname{Re} \right) + Lg^{2} \left( \operatorname{Re} \right) - 0.0306Lg^{3} \left( \operatorname{Re} \right)$ for  $40 < \operatorname{Re} < 1000$  (1987)

אציין כי (Levy et al. (1998 השתמשו בקורלאציות אלו וקבלו התאמה טובה לתוצאות ניסויות. אי לכך גם בעבודה זו השתמשתי בקורלציות אלו.

#### עבודה ומעבר חום

: בעבודה התחשבתי רק בעבודה המתבצעת בין הפאזות. עבודה זו ניתנת לביטוי על ידי $W_g = -W_d = -F_g u_d = F_d u_d$  (2.21)

מכיוון שהנחנו שאין מעבר חום בין החלקיקים לעצמם וכי מעבר החום בין החלקיקים לגז מתבצע בהסעה בלבד, ניתן לבטא את מעבר החום בין הפאזות על ידי:

$$Q_{d} = -Q_{g} = N_{d} \pi D_{d}^{2} h \left( T_{g} - T_{s} \right) = \frac{6\phi_{d}}{D_{p}} h \left( T_{g} - T_{s} \right)$$
(2.22)

במשוואה זו  $T_s$  הינה טמפרטורת מעטפת החלקיק. על מנת לחשב את כמות החום שעברה במשוואה זו  $T_s$  הינה טמפרטורת מעטפת החלקיק. על מנת לחשב את כמות החום שעברה בין החלקיק לפאזת הגז יש למצוא את מקדם מעבר החום בין פאזת חלקיקים לבין פאזה גזית. מקדם מעבר חום בהסעה, h, התקבל ממספר נוסלט, Nu, המבוטא בדרך כלל כפונקציה של מספרי רינולדס, Re, ופרנטל, דאופן הבא:

$$Nu = \frac{hD_p}{k_g} = F(\text{Re}, \text{Pr}); \text{Re} = \frac{\rho_g |u_r| D_p}{\mu_g}; \text{Pr} = \frac{\mu_g c_{pg}}{k_g}$$
(2.23)

Baeyens et al. (1995) הציג מספר קורלאציות שעליהן ניתן להסתמך בחישוב מקדם Baeyens et al. (1995), Baeyens et al. (1995) מעבר חום. מידת התאמתן לתוצאות ניסיוניות נבחנה על ידי (4.2.1 בעבודה הנוכחית (ראה פרק 1.2.1). Levy and Borde (1999)

: להלן הקורלאציות המקובלות לחישוב מספר נוסלט, Nu, בזרימה גז- חלקיקים

(Fluidized bed) א) הקורלאציה של Gamson פותחה עבור מצע מרחף ( $Nu = 1.06 \operatorname{Re}_d^{0.59} \operatorname{Pr}^{0.33}$  (2.24)

(Pneumatic dryer) ב) הקורלאציה של De Brandt פותחה עבור מייבש פנאומטי $Nu = 0.16 \operatorname{Re}_{d}^{1.3} \operatorname{Pr}^{0.67}$  (2.25)

קוטר פנאומטי בעלת קוטר Baeyens et al. ג) הקורלאציה של גדול.

$$Nu = 0.15 \operatorname{Re}_d \tag{2.26}$$

ד) הקורלאציה של Ranz-Marshall פותחה עבור ייבוש הלקיק בודד.  $Nu = 2 + 0.6 \operatorname{Re}_{d}^{0.5} \operatorname{Pr}^{0.33}$  (2.27)

השלב השני של תהליך הייבוש מתחיל, כאשר הלחות שעל פני מעטפת החלקיק נעלמה וייבוש פנים החלקיק מתחיל. בשלב השני של תהליך הייבוש (אידוי מליבה לחה דרך מעטפת יבשה) מניחים שמעבר החום מהמעטפת החיצונית של החלקיק לפאזה גזית שווה למעבר החום מהליבה הלחה לפאזה גזית. בהתבסס על הנחה זו נכתבה משוואת מאזן חום נוספת המאפשרת הערכת טמפרטורת המעטפת היבשה של החלקיק.

$$\left(T_g - T_s \left(\frac{1}{h\pi D_p^2}\right)^{-1} = \left(T_g - T_d \left(\frac{1}{h\pi D_p^2} + \frac{D_p - D_i}{2\pi D_p D_i k_{ps}}\right)^{-1}\right)$$
(2.28)

## מעבר המסה בין פאזת החלקיקים לפאזה הגזית

Levi-Hevroni et al. בעבודה זו התבססנו על המודל לייבוש חלקיק בודד שתואר על ידי (1995). מודל הייבוש מתאר את תהליך הייבוש כתהליך דו שלבי. השלב הראשון של התהליך הינו אידוי מים מהמעטפת החיצונית של החלקיק. בשלב זה ההתנגדות של פאזת הגז קובעת את קצב האידוי. באנלוגיה למעבר חום ניתן לבטא את מעבר מסה בעזרת מקדם מעבר מסה,  $h_d$ , והפרש ריכוזים/צפיפויות:

$$\dot{m}_{d} = h_{d} \pi D_{p}^{2} \left( \frac{M_{w} p_{vo}}{\Re T_{s}} - \frac{M_{w} p_{vg}}{\Re T_{g}} \right)$$
(2.29)

קצב מעבר המסה בנפח הבקרה ניתן לחישוב על ידי הכפלה של קצב פליטת מסה מחלקיק בודד, m<sub>d</sub>, בכמות החלקיקים בנפח בקרה, N<sub>d</sub>. בשלב הראשון של תהליך הייבוש בו מתבצע ייבוש אדי מים מפני החלקיק, ניתן לחשב את מעבר המסה באופן הבא:

$$Sm = N_d \dot{m}_d, \quad \dot{m}_d = h_d A_d \left( \rho_{v_p} - \rho_{v_g} \right)$$
 (2.30)

על מנת להעריך את מקדם מעבר המסה,  $h_d$ , השתמשתי באנלוגיה בין מעבר חום למעבר אל מנת להעריך את מקדם מעבר המסה, Sh, השתמשתי בספר ארווד, Pr, הוחלף במספר מסה. לצורך כך הוחלף מספר Nu במספר שרווד, Sc ומספר פרנטל, Sc

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_V} \quad , \quad Sh = \frac{h_d D_p}{D_V} = F(\text{Re}, Sc) \tag{2.31}$$

השלב השני של תהליך הייבוש מתחיל בנקודה הקריטית בה הלחות על פני שטח החלקיק, התייבשה. הנקודה הקריטית מוגדרת בעזרת היחס בין נפח הנוזל בחלקיק, לנפח החלקיק, המוגדר כנקבוביות החלקיק (porosity) ומסומן באות *3*, בעבודה זו הנחנו שנפח הנוזל בחלקיק שווה לנפח החללים של החלקיק, יחס זה תלוי בחומר ממנו עשוי החלקיק, בגודלם ובצורתם של הנקבובים ובדרך כלל מתקבל מניסויים.

במהלך השלב השני של הייבוש מתחילה להיווצר מעטפת יבשה הגורמת להתנגדות נוספת למעבר חום וחומר. התנגדות זו נשלטת על ידי דיפוזיה בין פני החלקיק, בקוטר Do, לבין למעבר חום וחומר. התנגדות זו בשלטת על ידי דיפוזיה בין פני החלקיק, בקוטר החיצוני הליבה הלחה, בעלת קוטר  $D_i$ . במהלך השלב השני של הייבוש הנחנו כי הקוטר החיצוני של החלקיק נשאר קבוע ואילו הקוטר של הליבה הלחה קטן. משוואה המתארת את קצב מעבר מסה מחלקיק בודד הוצגה על ידי (1987) Abuaf & Staub.

$$\dot{m}_{d} \frac{1}{2\pi\varepsilon} \left( \frac{1}{D_{o}} - \frac{1}{D_{i}} \right) = \frac{D_{v}p}{\Re T_{ave}} \ell n \left[ \frac{(p - p_{sat})}{(p - p_{vo})} \right]$$
(2.32)

מכיוון שהנחנו כי אדי המים היוצאים מהליבה עוברים לפאזת הגז ולא נשארים במעטפת היבשה, ניתן לומר כי קצב מעבר המסה מהמעטפת לאוויר (משוואה 2.29) שווה לקצב מעבר המסה בדיפוזיה מליבה, (משוואה 2.32). אי לכך ניתן לבטא את הלחץ החלקי של אדי המים במעטפת יבשה,  $p_{vo}$ , בעזרת משוואה (2.29) ולהציבו במשוואה (2.32) ובכך לקבל משוואה המתארת את קצב אידוי המים בצורה מפורשת:

$$\dot{m}_{d} = -\frac{D_{i} - D_{o}}{D_{o} D_{i}} \frac{2\pi\varepsilon D_{v} p}{\Re T_{ave}} \ell n \left( \left( p - p_{sat} \right) \right) \left( \left( p - \frac{RT_{s}}{h_{d} \pi D_{o}^{2} M_{w}} \dot{m}_{d} - \frac{p_{vg} T_{s}}{T_{g}} \right) \right)$$
(2.33)

#### שינוי קוטר החלקיק

בשלב הראשון של תהליך הייבוש, הקוטר החיצוני של החלקיק (הקוטר ה"לח") קטן בעקבות אידוי מפני המעטפת החיצונית. לכן שינוי הקוטר החיצוני תלוי בקצב אידוי המים מפני החלקיק באופן הבא:

$$\frac{dD_p}{dz} = \frac{2}{u_d \pi D_p^2 \rho_{wd}} \cdot \frac{dm_{wd}}{dt} = \frac{2}{u_d \pi D_p^2 \rho_{wd}} \cdot \frac{Sm}{N_d}$$
(2.34)

לאחר ייבוש פני החלקיק, הקוטר החיצוני של החלקיק נשאר קבוע, בעוד שקוטר הליבה הלחה קטן. נציין שגם הקוטר החיצוני עשוי לקטון ואף יכולה להתרחש דפורמציה של החלקיק, אבל כדי לפשט את המודל הנחנו שהקוטר החיצוני לא משתנה. את שינוי קוטר הליבה בתלות במרחק הייבוש ניתן לחשב באופן הבא:

$$\frac{dD_i}{dz} = \frac{2}{\varepsilon u_d \pi D_i^2 \rho_{wd}} \cdot \frac{dm_{wd}}{dt} = \frac{2}{\varepsilon u_d \pi D_i^2 \rho_{wd}} \cdot \frac{Sm}{N_d}$$
(2.35)

#### שינוי הריכוז המשקלי של המים בחלקיק (ξ)

בכדי לחשב את תכונות החלקיק יש לדעת את כמות המים המצויה בו. כמות זו מחושבת על ידי הריכוז המשקלי של המים בחלקיק המוגדר על ידי:

$$\xi = \frac{m_{wd}}{m_{wd} + m_s} \tag{2.36}$$

שינוי הריכוז המשקלי של המים בחלקיק לאורך המייבש תלוי אף הוא בקצב מעבר המסה ובזמן שהיית החלקיק במייבש. התלות בזמן השהייה מובע דרך מהירות החלקיק.

$$\frac{d\xi}{dz} = \frac{1-\xi}{u_d \rho_d V_{part}} \cdot \frac{dm_{wd}}{dt} = \frac{6(1-\xi)}{u_d \rho_d \pi D_p^3} \cdot \frac{Sm}{N_d}$$
(2.37)

## <u>צפיפות החלקיק</u>

בהנחת אדיטיביות נפחים, הצפיפות של החלקיק תלויה בצפיפות המוצק, בצפיפות המים ובכמות המים ובכמות המים בחלקיק. תלות זו מבוטאת באופן הבא:

$$\frac{1}{\rho_d} = \frac{\xi}{\rho_{wd}} + \frac{(1-\xi)}{\rho_s};$$

$$\rho_d = \frac{\rho_{wd}\rho_s}{\xi(\rho_s - \rho_{wd}) + \rho_{wd}}$$
(2.38)

# <u>חישוב היחס הנפחי של פאזת חלקיקים ( $\phi_d$ ) באלמנט נפח במייבש</u>

היחס הנפחי של פאזת הלקיקים ( $\phi_d$ ) ניתן לחישוב מתוך משוואת שימור מסה של פאזת היחס הנפחי של אזת חלקיקים.

$$\frac{\partial(\rho_d u_d \phi_d)}{\partial z} = -S_m; \ \phi_d = f(S_m, \rho_d, u_d)$$
(2.39)

#### <u>דיפוזיית אדי המים בפאזה גזית</u>

משוואת הדיפוזיה של אדי המים בפאזה גזית דומה למשוואת מעבר חום בפאזה גזית. לצורך כך הגדרנו את ריכוז אדי המים באוויר באופן הבא:

$$X_{w} = \frac{m_{wa}}{m_{g}} = \frac{m_{wa}}{m_{da} + m_{wa}}$$
(2.40)

בהנחה שאוויר מתנהג כגז אידאלי, צפיפותו תחשב באופן הבא:

$$R_{g} = \frac{\Re}{M_{g}}; M_{g} = Y_{w}M_{H_{2}O} + (1 - Y_{w})M_{da}$$

$$Y_{w} = \frac{X_{w}M_{da}}{X_{w}M_{da} + (1 - X_{w})M_{H_{2}O}};$$

$$\rho_{g} = \frac{P}{R_{g}T_{g}}$$
(2.41)

כאן  $Y_{w}$  הינו הריכוז המולרי של אדי המים באוויר.

משוואת הדיפוזיה של אדי המים בפאזה הגזית במערכת קואורדינטות גליליות נתונה על ידי:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\phi_g \rho_g u_g X_w) = \frac{\partial}{r \partial r} \left( D_g \rho_g \phi_g r \frac{\partial X_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_g \rho_g \phi_g \frac{\partial X_w}{\partial z} \right) + Sm$$
(2.42)

טבלה 2.1 מציגה את ריכוז המשוואות והנעלמים של המודל

המשוואה	מס' משוואה	נעלמים חדשים במשוואה	מס'
$\frac{\partial(\rho_g u_g \phi_g)}{\partial z} = S_m$	2.5	$ ho_{g}, u_{g}$ $\phi_{g}, S_{m}$	1
$\frac{\partial(\rho_g u_g^2 \phi_g)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\phi_g \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial r}\right)\right] + F_g + S_m u_d + \frac{\partial}{\partial z}\left(\phi_g \mu_g \frac{\partial u_z}{\partial z}\right)$	2.7	u <sub>d</sub> , F <sub>g</sub> P	2
$\frac{\partial(\rho_d u_d^2 \phi_d)}{\partial z} = -\rho_d g \phi_d + F_d - S_m u_d$	2.8	$\phi_{_d}$	3
$F_{d} = -F_{g} = N_{d}\rho_{g} \left[ c_{d} \frac{\pi D_{p}^{2}}{4} \frac{1}{2} \rho_{g} u_{r} \left  u_{r} \right  + c_{vm} \frac{\pi D_{p}^{3}}{6} u_{d} \frac{du_{r}}{dz} \right]$	2.17	$c_d$ $D_p$ , $N_d$	4
$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \phi_g \rho_g u_g \left( H_g + \frac{u_g^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \phi_g k_g r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + Q_g - W_g + S_m \left( H_{gd} + \frac{u_d^2}{2} \right)$	2.10	$T_g, Q_g$ $W_g$	5
$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \phi_d \rho_d u_d c_s T_d \right] = Q_d - S_m H_{gd}$	2.12	$T_d$	6
$C_d = f\left(u_r, D_p, \mu_g\right)$	2.20		7
$h = f\left(u_r, D_p, \mu_g, \rho_g, k_g, c_{pg}\right)$	2.24- 2.27	h	8
$W_g = -W_d = -F_g u_d = F_d u_d$	2.21		9
$Q_{d} = -Q_{g} = N_{d}\pi D_{d}^{2}h(T_{g} - T_{s}) = \frac{6\phi_{d}}{D_{p}}h(T_{g} - T_{s})$	2.22	$T_s$	10
$ \left(T_g - T_s\right) \left(\frac{1}{h\pi D_p^2}\right)^{-1} = \left(T_g - T_d\right) \left(\frac{1}{h\pi D_p^2} + \frac{D_p - D_i}{2\pi D_p D_i k_{ps}}\right)^{-1} $	2.28	$D_i$	11
$h_d = f\left(D_v, D_p, \mu_g, \rho_g\right)$	2.31	$h_{d}$	12
$\dot{m}_{d} = -\frac{D_{i} - D_{o}}{D_{o}D_{i}} \frac{2\pi\varepsilon D_{v}p}{\Re T_{ave}} \ell n \left( \frac{p - p_{sat}}{p - \frac{RT_{s}}{h_{d}\pi D_{o}^{-2}M_{w}}} \dot{m}_{d} - \frac{p_{vg}T_{s}}{T_{g}} \right)$	2.33	ṁ <sub>а</sub>	13
$N_d = \frac{6\phi_d}{\pi D_p^3}$	2.18		14
$Sm = \overline{N_d \ \dot{m}_d}$	2.30		15

טבלה 2.1 ריכוז המשוואות והנעלמים

$\frac{dD_p}{dz} = \frac{2}{u_d \pi D_d^2 \rho_{wd}} \cdot \frac{Sm}{N_d}$	2.34		16
$\frac{dD_i}{dz} = \frac{2}{\varepsilon u_d \pi D_i^2 \rho_{wd}} \cdot \frac{Sm}{N_d}$	2.38		17
$\frac{d\xi}{dz} = \frac{6(1-\xi)}{u_d \rho_d \pi D_d^3} \cdot \frac{Sm}{N_d}$	2.37	Ψζ	18
$\frac{1}{\rho_d} = \frac{\xi}{\rho_{wd}} + \frac{(1-\xi)}{\rho_s}$	2.38	$ ho_{_d}$	19
$\frac{\partial(\rho_d u_d \phi_d)}{\partial z} = -S_m; \ \phi_d = f(S_m, \rho_d, u_d)$	2.39		20
$\phi_g + \phi_d = 1$	2.16		21
$\frac{\partial}{\partial z} \left( \phi_g \rho_g u_g X_w \right) = \frac{\partial}{r \partial r} \left( D_g \rho_g \phi_g r \frac{\partial X_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_g \rho_g \phi_g \frac{\partial X_w}{\partial z} \right) + Sm$	2.42	$X_w$	22
$R_{g} = \frac{\Re}{M_{g}}; M_{g} = Y_{w}M_{H_{2}O} + (1 - Y_{w})M_{da}$			
$Y_{w} = \frac{X_{w}M_{da}}{X_{w}M_{da} + (1 - X_{w})M_{H_{2}O}};$	2.41		23
$\rho_g = \frac{P}{R_g T_g}$			

מערכת המשוואות המוצגת בטבלה 2.1 כוללת 23 משוואות ו- 23 נעלמים. אי לכך המודל סגור וביחד עם תנאי הגבול המתארים זרימה במייבש פנאומטי ניתן לפותרו ולחזות את שדה הזרימה במייבש. תנאי הגבול יוגדרו בסעיף 3.3.

-ה נלקחו הבאות  $k_g$  -ו  $D_v, \mu_g, c_{p_{water vapor}}, \rho_{v_p}$  הבאות הבאות גנלקחו מ-Bird (1960).

#### <u>פרק 3 – הסכימה הנומרית</u>

## 3.1 כללי

בפרק זה נציג את המודל הנומרי ומערכת המשוואות הנומריות שפותחו לפתרון מערכת המשוואות שהוצגה בפרק הקודם, עבור שדה הזרימה במייבש פנאומטי. הרשת הנומרית ואלגוריתם הפתרון יוצגו אף הם. האלגוריתמים הקיימים בספרות לפתרון בעיות מסוג זה עליהם התבססנו במהלך הפיתוח הוצגו בפרק 1.4.

#### 3.2 המודל הנומרי

פתרון משוואות השימור עבור הפאזה הגזית [משוואות דיפרנציאליות בנגזרות חלקיות פתרון משוואות השימור עבור הפאזה הגזית [משוואות 1980) אשל Patankar. המשוואות השימור של פאזת האחרות [משוואות דיפרנציאליות רגילות (ODE)], משוואות השימור של פאזת החלקיקים למשל, נפתרו בשיטת הפרשים סופיים לאורך שיכבה דיסקרטית (פתרון חד-ממדי).

במידה ושדה המהירות נתון, ניתן לפתור את המשוואות לקבלת ערכים סקלריים, כגון טמפרטורה, לחות יחסית, צפיפות וכו'. לכן הפתרון האיטרטיבי מתחיל בפתרון שדה המהירויות של פאזת הגז. על מנת לפתור את שדה הזרימה עלינו לפתור את משוואת שימור התנע ומשוואת שימור המסה [ראה משוואות (2.7) ו- (2.2)]. בפתרון משוואות אילו ישנן שתי בעיות עיקריות:

- $\frac{\partial(\rho_g u_g^2 \phi_g)}{\partial r}$  משוואת שימור תנע כוללת ביטויים לא ליניאריים, למשל -
- הצימוד בין משוואות השימור לגז ולמוצק והעדר דרך מפורשת למציאת שדה הלחץ.

במידה וידוע גרדיאנט הלחץ, ניתן לפתור את שדה המהירויות בעזרת שלל של במידה וידוע גרדיאנט הלחץ, ניתן לפתור את שדה המהירויות בעזרת שלא אלגוריתמים וסכמות קיימות (ראה Malalasekera (1998)). במידה אלגוריתמיה דחיסה יש לפתור ראשית את משוואת מאזן המסה ולאחר מכאן למצוא את הלחץ והזרימה דחיסה יש לפתור ראשית את משוואת מאזן המסה ולאחר מכאן למצוא את הלחץ ממשוואת המצב:  $p = p(\rho,T)$  אלגוריתם ממשוואת המצב: ה- SIMPLE מתבסס על פתרון בדרך של ניחוש, טעיה ותקון. בעזרתו פותרים את שדה הלחצים ומסתיים ברגע

שמוסגת התכנסות הערכים בשדות הלחץ והמהירות. סכימה זו או ליתר דיוק הרחבתה לזרימה דו-פאזית מאפשרת התחשבות בצימוד בין הפאזות ולכן נבחרה כסכימה מועדפת לפתרון שדה הזרימה במייבש הפנאומטי. הסבר מפורט על SIMPLE algorithm ראה בפרק 3.2.3.

#### 3.2.1 דיסקרטיזציה של נפח בקרה

בשיטת הנפחים הסופיים, תהליך הפתרון מתחיל מדיסקרטיזציה של מרחב החישוב ומשוואות הנפחים הסופיים, תהליך הפתרון מתחיל מדיסקרטיזציה של מרחב החישוב ומשוואות השימור הרלוונטיות. בעבודה זו בחרנו לחלק נפח בקרה לנפחים סופיים בעלי בצורה טבעתית (ראה איור 3.1). ציר הסימטריה של כל ה "נפחים הסופיים" משוטף ומתלכד עם ציר הסימטריה של המייבש. צורת הרישות שנבחרה לצורך פתרון הבעיה ידוע staggered grid שנבחרה למול עם ציר הסימטריה של המייבש. צורת הרישות שנבחרה לצורך פתרון הבעיה ידוע התלכד עם ציר הסימטריה של המייבש. צורת הרישות שנבחרה לצורך פתרון הבעיה ידוע המתלכד עם ציר הסימטריה של המייבש. צורת הרישות שנבחרה לצורך פתרון הבעיה ידוע המתלכד עם ציר הסימטריה של המייבש. צורת הרישות שנבחרה לצורך פתרון הבעיה ידוע המסומנים ב-( $\bigcirc$ ), כאשר האינדקסים של הצמתים הנ"ל יסומנו באותיות לועזיות גדולות, המסומנים ב-( $\bigcirc$ ), כאשר האינדקסים של הצמתים הנ"ל יסומנו באותיות לועזיות גדולות, המסומנים ב-( $\bigcirc$ ), כאשר האינדקסים של הצמתים הנ"ל יסומנו באותיות לועזיות גדולות, המסומנים ב-( $\bigcirc$ ), כאשר האינדקסים של הצמתים הנ"ל יסומנו באותיות לועזיות גדולות, למשל (I,J) ואילו מהירויות ושאר גדלים וקטוריים יחושבו בגבולות נפח הבקרה הדיסקרטי (רשת של קווים מקווקווים). במילים אחרות קיימת רשת משנית המשמשת לחישוב שדה המהירויות וצמתיה ממוקמות בגבולות נפח הבקרה. האינדקסים של הצמתות האלו יסומנו באותיות לועזיות גדולות וקטנות, למשל (I,J). כיוון וקטורי המהירות מסומן האלו יסומנו באותיות לועזיות גדולות וקטנות, למשל (I,J). כיוון וקטורי המהירות מסומן הילו יסומנו באותיות לועזיות גדולות וקטנות, הבשת הנומרית לפתרון בעיות בעזרת אלגוריתם ה- ( $\longrightarrow$ ). הסבר מפורט על בחירת הרשת הנומרית לפתרון בעיות בעזרת אלגוריתם ה- (חבר שנת למצוא ב- (חפר)). מומרים התיחות למתרון בעזרת הלגוריתם היום היהותית הימות היה היהות היחות ה



איור 3.1 הגדרת "נפח סופי" בזרימה אקסיסמטרית


איור 3.2 סכמת רישות של מייבש

## (PDE) דיסקרטיזציית משוואות השימור בפאזה גזית 3.2.2

לאחר דיסקרטיזציה של נפח בקרה, תוצג בסעיף זה שיטת הדיסקרטיזציה של משוואות השימור. משוואת שימור התנע לאחר דיסקרטיזציה קבלה את הצורה הבאה:

$$a_{i,J}u_{i,J} = \sum a_{nb}u_{nb} + (p_{I-1,J} - p_{I,J})A_{i,J} + b_{i,J}$$
(3.1)

 $-A_{i,J}$ , (מעברי מסה ותנע), געברי האינטראקציה בין-פאזיות (מעברי מסה ותנע), כאשר  $b_{i,J}$  מתייחס לשטח מעטפת הניצב לכיוון הזרימה. את המקדמים  $a_{nb}$  ו-  $a_{ni,J}$  גיתן לקבל בתלות בסכימת הדיסקרטיזציה. לדוגמה עבור דיסקרטיזציה בשיטת הפרשים סופיים לפתרון ניסעיות הדיסקרטיזציה עבור ניסקרטיזציה בסכימות upwind ,central ניתן להשתמש בסכימות (Versteeg & Malalasekera (1998).

קיימות מספר סכימות דיסקרטיזציה המתאימות לפתרון בעיות מהסוג הסעה-הולכה (hybrid). לצורך המחקר הנוכחי בחרנו בסכימה משולבת (hybrid). הסכימה הוצגה על ידי (Spalding (1972, ונחשבת לסכימה יציבה ומהווה שילוב

-Upwind Differencing Scheme - (CDS) -Central Differencing Scheme של Peclet ). כקריטריון לשימוש בסכימה הראשונה או השניה משמש מספר פקלט (UDS) (Number). מספר פקלט מחושב על שפת תא החישוב. לדוגמה בשפה המערבית (west):

$$Pe_{w} = \frac{F_{w}}{D_{w}} = \frac{(\rho u \phi)_{w}}{\Gamma_{w} / \delta x_{WP}}$$
(3.2)

.  $Pe \ge 2$  כאשר UDS ואילו בסכימה CDS עשימוש ב סכימה CDS עשימוש ב סכימה כחשי כב אשר ב סכימה עבור זרימה דיסקרטיזציה תיראה כך  $\varphi_P = a_W \varphi_W + a_E \varphi_E + a_S \varphi_S + a_N \varphi_N$  (3.3)

:המקדם  $a_P$  יחושב על ידי

$$a_P = a_W + a_E + a_S + a_N + \Delta F \tag{3.4}$$

ואילו שאר המקדמים במשוואה זו יחושבו באופן המוצג בטבלה 3.1.

כפי שניתן לראות מטבלה 3.1 המקדמים של המשוואה הדיסקרטית תלויים בשטף מוסע diffusive) D - והמוליכות הדיפוזיבית (convective flux) ליחידת מסה- F (conductance conductance) דרך גבולות של נפח הבקרה הדיסקרטי.

מקדם	ביטוי	
$a_{\scriptscriptstyle W}$	$\max\left[F_{w}, \left(D_{w} + \frac{F_{w}}{2}\right), 0\right]$	(3.5)
$a_{E}$	$\max\left[-F_e, \left(D_e - \frac{F_e}{2}\right), 0\right]$	(3.6)
$a_s$	$\max\left[F_s, \left(D_s + \frac{F_s}{2}\right), 0\right]$	(3.7)
$a_{\scriptscriptstyle N}$	$\max\left[-F_n, \left(D_n - \frac{F_n}{2}\right), 0\right]$	(3.8)
$\Delta F$	$F_e - F_w + F_n - F_s$	(3.9)

hybrid differencing טבלה 3.1 הישוב המקדמים של משוואה דיסקרטית בשיטת

השטף, F, יחושב באופן הבאה:

$$F_{w} = (\rho u \phi)_{w} = \frac{F_{i,J} + F_{i-1,J}}{2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\rho_{I,J} \phi_{I,J} + \rho_{I-1,J} \phi_{I-1,J}}{2} \right) u_{i,J} + \left( \frac{\rho_{I-1,J} \phi_{I-1,J} + \rho_{I-2,J} \phi_{I-2,J}}{2} \right) u_{i-1,J} \right]$$
(3.10)

$$F_{e} = (\rho u \phi)_{e} = \frac{F_{i+1,J} + F_{i,J}}{2} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\rho_{I+1,J} \phi_{I+1,J} + \rho_{I,J} \phi_{I,J}}{2} \right) u_{i+1,J} + \left( \frac{\rho_{I,J} \phi_{I,J} + \rho_{I-1,J} \phi_{I-1,J}}{2} \right) u_{i,J} \right]$$
(3.11)

והמוליכות הדיפוזיבית, D, מחושבת על פי:

$$D_w = \frac{\Gamma_{I-1,J}}{dr}, \text{ for } dr = const$$
(3.12)

$$D_e = \frac{\Gamma_{I,J}}{dr}, \text{ for } dr = const$$
(3.13)

$$D_{s} = \frac{\Gamma_{I-1,J} + \Gamma_{I,J} + \Gamma_{I-1,J-1} + \Gamma_{I,J-1}}{4dz}, \text{ for } dz = const$$
(3.14)

$$D_{n} = \frac{\Gamma_{I-1,J+1} + \Gamma_{I,J+1} + \Gamma_{I-1,J} + \Gamma_{I,J}}{4dz}, \text{ for } dz = const$$
(3.15)

# (ODE) דיסקרטיזציית משוואות שימור בפאזת החלקיקים 3.2.3

משוואות שימור של פאזת החלקיקים- משוואות דיפרנציאליות רגילות (ODE). צורתן הכללית:

$$\frac{d\varphi}{dz} = f(\varphi) \tag{3.16}$$

צד שמאל של המשוואות אילה ניתן להציג באופן הבאה:

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\varphi(z_0 + \Delta z) - \varphi(z_0)}{\Delta z} - \text{forward difference approximation}$$
(3.17)

סכימת דיסקרטיזציה זו שימשה לפתרון משוואות מאזן אחרות מסוג (ODE).

נציין כי דיוק הסכימה, במונחים של שגיאת קיטוע של טור טיילור, הוא מסדר ראשון, כמו בסכימה hybrid ששימשה לפתרון משוואות שימור בפאזת הגז. ניתן להגיד שפתרון שלנו הוא מסדר ראשון.

### SIMPLE אלגוריתם ה- 3.2.4

השם SIMPLE לא ניתן מפני שהאלגוריתם הנו פשוט. למעשה הנו קיצור של SimPLE השם Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations. שיטת חישוב זו הוצגה בכעבודות של (Patankar (1980) ומשמשת לפתרון בעיות בהן Spalding (1972) ו Patankar (1980) משוואות השימור מצומדות דרך הלחץ. פתרון מערכת המשוואות מתבצע על ידי תהליך משוואות השימור מצומדות דרך הלחץ. פתרון מערכת המשוואות במחשר ב- (procedure prediction-correction) במרחב החישוב המסודר ב- staggered grid. איור 3.3 מציג באופן סכימתי את תהליך הפתרון בשיטת ה- Simple

כדי להתחיל את תהליך החישוב יש לנחש את שדה הלחץ  $p^*$  בהסתמך על הניחוש פותרים את משוואת שימור התנע:

$$a_{i,J}u_{i,J}^* = \sum a_{nb}u_{nb} + \left(p_{I-1,J}^* - p_{I,J}^*\right)A_{i,J} + b_{i,J}$$
(3.18)

.  $p^*$  מוגדר כהפרש בין ערך אמיתי של שדה הלחץ p וערך מנוחש p' p' מוגדר (3.19)

.  $u^{*}$  לבין בין הפרש הזרימה הזרימה ע<br/> uלבין אנו מגדירים את באופן באופן <br/>  $u^{*}=u-u^{\prime}$ 

בהצבה של משוואות (3.18) ו- (3.17) למשוואה (3.16) נקבל:

$$a_{i,J}\left(u_{i,J} - u_{i,J}'\right) = \sum a_{nb}\left(u_{nb} - u_{nb}'\right) + \left[\left(p_{I-1,J} - p_{I-1,J}'\right) - \left(p_{I,J} - p_{I,J}'\right)\right]A_{i,J}$$
(3.21)

מכיוון שמשוואה עבור הערכים האמיתיים שווה זהותית לאפס ניתן לרשום משוואה זו על הערכים המתוקנים באופן הבא:

$$a_{i,J}u'_{i,J} = \sum a_{nb}u'_{nb} + \left(p_{I-1,J} - p'_{I,J}\right)A_{i,J}$$
(3.22)

Patankar הנחת יסוד של אלגוריתם ה- SIMPLE היא שאיברי ה- ∑*a<sub>nb</sub>u'nb* זניחים. (1980) מציין חיוניותה של ההנחה הנ"ל ליציבות הפתרון והעדר השפעה משמעותית על טיב הפיתרון. אי לכך משוואה (3.20) נרשמה באופן הבא:

$$u'_{i,J} = d_{i,J} \left( p'_{I-1,J} - p'_{I,J} \right)$$
  
$$d_{i,J} = \frac{A_{i,J}}{a_{i,J}}$$
(3.23)

בהצבת תיקון המהירות, משוואה (3.21) במשוואה (3.18) נקבל:

$$u_{i,J} = u_{i,J}^* + d_{i,J} \left( p_{I-1,J}' - p_{I,J}' \right)$$
(3.24)



איור 3.3 תרשים זרימה לאלגוריתם הפתרון בשיטת

# ה- SIMPLE

## (pressure correction equation) "תיקון לחץ 3.2.5 משוואת "תיקון לחץ"

בשלב שני של אלגוריתם ה- SIMPLE נפתרת משוואת "תיקון לחץ", משוואה זו פותחה על בסיס משוואת הרציפות:

$$\left(\rho\phi uA\right)_{i+1,J} - \left(\rho\phi uA\right)_{i,J} = Sm\tag{3.25}$$

לאחר הצבת משוואה (3.22) למשוואה (3.23) נקבל:

$$\rho_{i+1,J}\phi_{i+1,J}A_{i+1,J}\left(u_{i+1,J}^{*}+d_{i+1,J}\left(p_{I,J}'-p_{I+1,J}'\right)\right) - \rho_{i,J}\phi_{i,J}A_{i,J}\left(u_{i,J}^{*}+d_{i,J}\left(p_{I-1,J}'-p_{I,J}'\right)\right) = Sm$$
(3.26)

או בצורה אחרת:

$$\begin{bmatrix} (\rho\phi dA)_{i+1,J} + (\rho\phi dA)_{i,J} \end{bmatrix} p'_{I,J} = = (\rho\phi dA)_{i+1,J} p'_{I+1,J} + (\rho\phi dA)_{i,J} p'_{I-1,J} + \begin{bmatrix} (\rho\phi u^*A)_{i,J} - (\rho\phi u^*A)_{i+1,J} \end{bmatrix} + Sm$$
(3.27)

(pressure correction equation) לאחר סידור איברים מקבלת משוואת "תיקון לחץ" (אחר סידור הבאה:

$$a_{I,J}p'_{I,J} = a_{I-1,J}p'_{I-1,J} - a_{I+1,J}p'_{I+1,J} + b'_{I,J}$$
(3.28)

.SIMPLE - איור 3.3 מציג באופן סכימתי את תהליך הפתרון בשיטת ה

## 3.3 תנאי הגבול

חלק מהפרמטרים החשובים המשפיעים על הפתרון של שדה הזרימה הינם תנאי גבול (initial conditions) ותנאי התחלה (boundary conditions) של הבעיה הנדונה. מכיוון שבמקרה הנדון התהליך המתבצע לא תלוי בזמן אנו נדרש לקיים תנאי גבול בלבד. הסבר מפורט לגבי תנאי הגבול וההתחלה בפתרון בעיות בשיטת "נפחים סופיים" ניתן למצוא ב- (Versteeg & Malalasekera (1998).

על מנת להפעיל את תנאי הגבול בסימולציה למרחב החישוב נוספו תאים נומריים, בהם נשמרים התכונות המהוות את תנאי הגבול. מיפוי התאים הנוספים מוצג באיור 3.4.



איור 3.4 מיפוי התאים הנוספים עבור תנאי הגבול במרחב החישוב

תנאי הגבול כוללים:

- (inlet) תנאי כניסה -
- (outlet) תנאי יציאה -
- (wall) תנאי גבול בדופן המייבש -
  - תנאי סימטריה במרכז המייבש

## (inlet) תנאי כניסה 3.3.1

כעקרון תנאי הכניסה למערכת הייבוש ידועים. המשתנים הידועים בכניסה כוללים את מהירויות הכניסה של הגז והחלקיקים, הטמפרטורות, הלחויות של המוצק ושל האוויר, צפיפות של החלקיק וכו'. אי לכך על מנת לפתור את המשוואות הדיפרנציאליות השונות נציב את הערכים הידועים בגבולות במשוואות הרלוונטיות. בפתרון משוואת "תיקון לחץ", מחשבים את הלחץ הפרשי בכניסה על סמך הנחה שהלחץ ההפרשי ביציאה מהמייבש ידוע ושווה ל- 0.

# (outlet) תנאי יציאה 3.3.2

ביציאה מהמייבש אנו מניחים זרימה מפותחת, או במילים אחרות כל הגרדיאנטים ביציאה מהמייבש אנו מניחים זרימה מפותחת, או במילים אחרות כל הגרדיאנטים בכיוון הזרימה שווים ל- $\left(\frac{\partial}{\partial z}=0
ight)$ , פרט, לשדה לחצים. הנתון על ידי לחץ הפרשי ידוע.

## (wall) תנאי גבול בדופן 3.3.3

הנחת העבודה היתה שאין זרימה דרך הדופן ואין החלקה על הדופן. לכן מהירות הגז בדופן, בכיוון הזרימה, שווה ל- 0.

מכיוון שאין מעבר חומר (דיפוזיה) דרך הדופן, הנחנו כי הנגזרות של שינוי הריכוז מכיוון שאין מעבר חומר  $\left. \frac{\partial}{\partial r} \right|_{wall} = 0$  בדופן שווה ל- 0. אי לכך תנאי הגבול במשוואת הדיפוזיה של המים מקיים 0.

תנאי גבול שונים יכולים להתאים לפתרון משוואת מעבר החום בפאזה גזית. תנאי גבול אלו תלויים באופי הבעיה, לדוגמה:

- $(T_{wall} = const)$  טמפרטורת דופן קביעה -
- . ( $T_{wall} = T(z)$ ) טמפרטורת של המרחק טמפרטורת דופן נתונה -

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} = const\right)$$
 שטף חום קבוע -

$$\left(rac{\partial}{\partial r}=0
ight)$$
- תנאי גבול אדיאבטי -

כל האפשרויות הנזכרות לעיל יושמו בקוד הנומרי ונבחנו לאורם של הבעיות השונות כפי שיוסבר בהמשך.

#### 3.3.4 תנאי סימטריה במרכז המייבש

מכיוון שהמודל של הבעיה הינו אקסיסמטרי נרשום תנאי הגבול במרכז המייבש, עבור כל  $\frac{\partial}{\partial r} = 0$ .

#### 3.4 יציבות הפתרון

הפתרון הנומרי כולל פתרון מספר רב של משוואות דיסקרטיות. כמו בכל פתרון נומרי יש להתמודד עם בעית היציבות של הפתרון. להלן נציג את שני הגורמים העיקריים, המשפעים על יציבות הפתרון והדרכים להתמודדות איתם:

א. *סכימה נומרית*. ככל שעולה דרגת הסכימה הנומרית, כך עולה דיוק הפתרון, יחד עם זה עולה רגישותו של הפתרון להפרעות שונות, למשל אוסצילציות במהלך ההתכנסות. בעבודה הנוכחית נעשה שימוש בסכימה hybrid, הידועה כסכימה נומרית יציבה [ראה (Crowe (1982). חסרונה של הסכימה הזו הינו רמת הדיוק של הפתרון. על מנת לשפר את דיוק הפתרון ניתן לעדן את הרשת הנומרית של מרחב החישוב.

ב. מקדמי ה- under-relaxation. אמצעי נוסף שאמור להבטיח את יציבות הפתרון הוא שימוש בטכניקת תיקון שגיאה המרסנת את האוסצילציות הנגרמות בתהליך הניחוש והטעיה. לדוגמה עבור תיקון הלחץ נרשום:

(3.29)

$$p^{new} = p^* + \alpha_p p'$$

. כאשר הלחץ ריסון מקדם הינו מקדם -  $lpha_p$ 

באופן דומה ניתן לרשום את הנוסחה הבאה לצורך חישוב התכונות האחרות (מהירות, מספרטורה וכדו') טמפרטורה וכדו')

φ<sup>new</sup> = α<sub>φ</sub>φ + (1-α<sub>φ</sub>)φ<sup>(n-1)</sup>, , πCline cfWn, φ (3.30)

. קביעת המקדם  $\alpha$  (נע בין 0ל-1), לכל תכונה נעשה בשיטת ניסוי טעייה)  $\alpha$ 

נציין כי למקדם הריסון השפעה רבה על התכנסות הפתרון, אך לאחר התכנסות הפתרון אין הוא משפיע על הפתרון הסופי של שדה הזרימה (הסבר מפורט ניתן למצוא ב- (Versteeg & Malalasekera (1998).

## פרק 4 – הסימולציה הנומרית

על מנת לתת תוקף למודל הפיסיקלי ולתחזיות המודל הנומרי בוצעו סימולציות נומריות על מנת לתת תוקף למודל הפיסיקלי ולתחזיות המודל הנומרי בוצעו סימולציה הנומרית הושוו לתוצאות עבור תהליכי ייבוש של חלקיקי PVC וחול. תוצאות הסימולציה הנומרית הושוו לתוצאות Silva & Correa (1998) (ראה (1998) Baeyens et al. (1995) ומודלים נכתבה בשפת נספינציה בסביבות Baeyens et al. (1995) Digital וניתנת לקומפילציה בסביבות Windows 98 ומעלה ו- Digital וניתנת לקומפילציה בסביבות Unix

### 4.1 ייבוש חלקיקי חול

תוצאות הסימולציה הנומרית, המבוססת על הקורלאציה של Baeyens et al. למעבר חום, הושוו לתוצאות ניסויות של Rocha (1988). במקביל נעשתה השוואה למודלים מתמטיים Levy & Borde -I Silva & Correa (1998). ראה Silva & Correa (1998).

## 4.1.1 התהליך הפיזיקלי

ב- Silva & Correa (1998) לא הוצגו נתונים לגבי נקבוביות החלקיק, מהירות Silva & Correa (1998) התחלתית ושבר הנפחי של החלקיקים. לכן הוחלט להניח כי  $\varepsilon = 0.15$  ואילו מהירות החלקיקים נקבעה בדרך של ניחוש/תיקון במהלך הסימולציה בהסתמך על ניחוש של שבר נפחי של החלקיקים בכניסה למייבש.

בניסוי נמדדו לחות וטמפרטורת החלקיקים בסוף התהליך ואילו לחות וטמפרטורת הגז נמדדו גם בסוף התהליך וגם במספר נקודות לאורך המייבש.

## 4.1.2 אופן השוואה בין תוצאות הסימולציות הדו-ממדית לחד-ממדית

תוצאות הסימולציה המוצגות באיורים 4.1, 4.2, 4.2 ו- 4.4 מציגות ערכים ממוצעים לחתך הזרימה. הצגת נתונים בצורה זו נעשתה כדי לאפשר השוואה בין תחזיות הסימולציות החד-ממדיות הקיימות בספרות, המדידה ה-"חד-ממדית" של הפרמטרים המאפיינים את שדה הזרימה בניסוי ותחזיות המודל הנוכחי הדו-ממדי. חישוב תכונה ממוצעת בחתך הזרימה (פרט לטמפרטורת הגז) שוקלל על פי המסה של הפאזה בחתך הזרימה.

$$\varphi = \frac{2\pi \int_{0}^{R} \rho u \varphi r dr}{2\pi \int_{0}^{R} \rho u r dr}$$
(4.1)

וחישוב הטמפרטורה הממוצעת של הגז בחתך הזרימה שוקלל על פי:

$$T_{ave} = \frac{2\pi \int_{0}^{R} \rho uc_{p} Tr dr}{2\pi \int_{0}^{R} \rho uc_{p} r dr}$$
(4.2)

מכיוון ששינוי בקיבול החום הסגולי של הגז,  $c_p$ , בתחום הטמפרטורות המקובלות בתהליך מכיוון ששינוי בקיבול החום הסגולי של ייבוש פנאומטי לא משמעותי (למשל בניסוי של ייבוש חלקיקי PVC קיבול החום הסגולי ייבוש פנאומטי לא משמעותי ( $c_p|_{T_{gin}\approx400K} = 1014 \left[ \frac{J}{(kg \cdot °C)} \right]$  לבין  $c_p|_{T_{gout}\approx340K} = 1009 \left[ \frac{J}{(kg \cdot °C)} \right]$ של הגז נע בין של הגז נע בין הייבוש

ניתן להתייחס אליו כקבוע וכתוצאה מכך משוואה (4.2) מתנוונת למשוואה (4.1).

# 4.1.3 השוואה בין תוצאות הסימולציה לתוצאות ניסויות ומודלים קיימים

בדומה ל- Levy & Borde (1999) הסימולציה הנוכחית בוצעה עבור תהליך אדיאבטי ועבור תהליך כאשר טמפרטורת דופן המייבש ידועה (ירידה ליניארית מ- 360 K בכניסה למייבש ל- 354K ביציאה ממנו).

באיורים (a-d) מוצגת השוואה בין התכונות השונות, שהתקבלו בסימולציה עבור (a-d) באיורים (תהליך אדיאבטי לבין התוצאות הניסויות והמודלים השונים. ניתן לציין שבסימולציה עבור תהליך אדיאבטי התקבלה התאמה טובה לתוצאות ניסויות של תכולת המים בחלקיק והלחות של הגז. בהשוואת הטמפרטורות התקבלה סטייה שנבעה כנראה מהעובדה

שבמהלך הניסוי היה מעבר חום בין הגז לדפנות המייבש והתהליך לא היה אדיאבטי. בהשוואת תוצאות החיזוי הנומרי לתוצאות החיזוי של המודלים האחרים התקבל שתחזיות המודל היו קרובות לחיזוי של DryPak ולחיזוי של (1999) Borde לים המודלים מהתבוננות בגרפי שינוי הטמפרטורות, (4.1(a,b), ניתן לראות כי תוצאות של כל המודלים קרובות, אך אף אחד לא מצליח לחזות את השתנות טמפרטורת הגז. מגרפים (c,d), 4.1 קרובות, אך אף אחד לא מצליח לחזות את השתנות טמפרטורת הגז. מגרפים (1999) ניתן לראות שקיימת התאמה בין תחזיות המודלים של Borde (1997), ביתן לראות שיימת התאמה בין תחזיות המודלים של הנוכחי ניתן לראות שקיימת התאמה בין תחזיות המודלים של 1998, ניתן לראות רית ניתן לראות שקיימת התאמה בין תחזיות המודלים של 1998, ניתה במייבש לא היתה מים לראות שקיימת התאמה בין תחזיות המודלים של אהנחה הזרימה במייבש לא היתה מים לסארית (1999) המודל הנוכחי לתוצאות ניסויות. בהתבסס על הנחה זו בוצעה השוואה בין תחזיות מ- 360K ל- 354K לאורך המייבש. בהתבסס על הנחה זו בוצעה השוואה בין תחזיות הסימולציות הנומריות של (1999) Borde (1999), DryPak, Levy & Borde (1999) והמודל הנוכחי. איורים (a-d) ביתן לראות כי קיימת התאמה בין תחזיות המודלים של הניסויות. מגרפים אלו ניתן לראות כי קיימת התאמה בין תחזיות המודלים של הניסויות. מגרפים אלו ניתן לראות כי קיימת התאמה בין תחזיות המודלים של הניסויות. בשונה מהסימולציה עבור תהליך אדיאבטי התקבלה כאן התאמה טובה בין תחזיות המודל לשדה הטמפרטורות והתוצאות הניסויות.

ראוי לציין שהתנהגות התכונות של הפאזות במייבש פנאומטי הינה אופיינית עבור כל מייבש פנאומטי. אם נתבונן באיור 1.3 שהוצג על ידי (2001) Pelegrina & Crapiste (2001) נגלה דמיון בין אופן השתנות תכונות הפאזות בעבודה שלנו ושלהם. מזה ניתן להסיק שבכל מייבש מהסוג הזה התהליכים מתרחשים באופן הבא: חלקיקים מתחממים מהר מאוד שבכל מייבש מהסוג הזה התהליכים מתרחשים באופן הבא: חלקיקים מתחממים מהר מאוד לאחר תחילת הייבוש וזה גורם לאידוי מואץ של הנוזל מפני שטח של החלקיק, במהלך אידוי של הנוזל החופשי טמפרטורת החלקיק כמעט ולא משתנה. בסוף התהליך אפשרית התחממות של המוצק כתוצאה מכך שאנרגיה העוברת מהגז למוצק כבר לא מנוצלת כולה לתהליך אידוי הנוזל, אלה גם לחימום החלקיק.



איור השונות לתוצאות ניסויות הסימולציות הנומריות השונות לתוצאות ניסויות איור (a,b) איור לאורך המייבש. (a) שינוי טמפרטורת המוצק,

תנאי הגבול אדיאבטיים.

$$\left[\rho_p = 2622 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \ \dot{m}_g = 3.947 \ \text{x} 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ \dot{m}_p = 4.74 \ \text{x} 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ d_p = 380 \mu\text{m}, \ D_{dryer} = 5.25 \ cm\right]$$



איור (c,d) איור השונות לתוצאות ניסויות. (c) שינוי ריכוז המים באוויר (d) שינוי ריכוז המים במוצק לאורך המייבש. תנאי הגבול אדיאבטיים. תוצאות ניסויות של ייבוש חול הוצגו על ידי (Rocha (1988).

$$\left[\rho_p = 2622 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \ \dot{m}_g = 3.947 \ \text{x} 10^{-2} \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ \dot{m}_p = 4.74 \ \text{x} 10^{-3} \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ d_p = 380 \mu\text{m}, \ D_{dryer} = 5.25 \ cm\right]$$



איור (a,b) איור הסימולציה הנומרית השונות לתוצאות ניסויות. איור (b) שינוי טמפרטורת המוצק, (b) שינוי טמפרטורת הגז לאורך המייבש. תנאי הגבול: ירידה ליניארית  $T_{wall} = 360K \rightarrow 354K$  ייבוש חול הוצגו על ידי Rocha (1988).

$$\left[\rho_p = 2622 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \ \dot{m}_g = 3.947 \ \text{x} 10^{-2} \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ \dot{m}_p = 4.74 \ \text{x} 10^{-3} \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ d_p = 380 \mu\text{m}, \ D_{dryer} = 5.25 \ cm\right]$$



איור (c,d) איור הסימולציה הנומרית השונות לתוצאות ניסויות. איור (c) שינוי ריכוז המים באוויר (d) שינוי ריכוז המים במוצק לאורך המייבש תנאי הגבול: ירידה ליניארית  $T_{wall} = 360K \rightarrow 354K$  ייבוש חול הוצגו על ידי Rocha (1988).

$$\left[\rho_p = 2622 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \ \dot{m}_g = 3.947 \ \text{x} 10^{-2} \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ \dot{m}_p = 4.74 \ \text{x} 10^{-3} \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ d_p = 380 \mu\text{m}, \ D_{dryer} = 5.25 \ cm\right]$$

## PVC ייבוש חלקיקי 4.2

Baeyens et al. (1995) גדול. בעקבות הניסויים וחוסר ההתאמה בין מקדמי מעבר החום שבספרות לזה המתקבל גדול. בעקבות הניסויים וחוסר ההתאמה בין מקדמי מעבר החום שבספרות לזה המתקבל מהניסוי הם פיתחו קורלאציה למעבר החום, (ראה משוואה 2.26). תוצאות הניסוי הושוו לתחזית המודל המפותח בעבודה זו הוחלט לתחזית המודל הנומרי שפתחו. על מנת לאמת את המודל המפותח בעבודה זו הוחלט לבצע סימולציה נומרית לתהליך הייבוש שהוצג על ידי (1995). במהלך האימות נבדקה השפעת הקורלאציות השונות למעבר החום על תחזית הסימולציה המומרית.

## 4.2.1 התהליך הפיזיקלי

1.25 הניסויים של Baeyens et al.(1995) התבצעו במייבש פנאומטי אנכי, בעל קוטר 1.25 הניסויים של 180μm<sup>3</sup> הניסויים של 180μm בגודל ממוצע 180μm וצפיפות 195 kg/m<sup>3</sup> מטר וגובה 25 מטר. חלקיקי (1.51kg/s בגודל ממוצע אוויר חם (399K), בספיקה של הוזרמו למייבש בספיקה של 1.51kg/s, ונסחפו על ידי אוויר חם (10.52 kg/s).

## 4.2.2 השוואה בין תחזית הסימולציה הנומרית לתוצאות ניסויות

בדומה להנחה של (1999) Borde גם הסימולציה הנוכחית בוצעה עבור תהליך עם טמפרטורת דופן ידועה (ירידה ליניארית מ- 325 K בכניסה למייבש ל- 320K ביציאה ממנו). איורים 4.3 (o) ו- (a) 4.3 ביציאה ממנו). איורים 4.3 (c) ו- (a) 4.3 ביציאה ממנו). איורים 4.3 (c) ו- (a) 4.3 ביציאה ממנו). איורים גומרית של Evy & Borde (1999) אשר נעשו לתוצאות ניסויות ולתוצאות סימולציות של (b) מוצגת השוואה בין תחזיות הסימולציה הנומרית לתוצאות ניסויות ולתוצאות סימולציות של (b) מוצגת השוואה בין תחזיות הסימולציה הנומרית לתוצאות ניסויות ולתוצאות סימולציות של (c) מוצגת השוואה בין תחזיות הסימולציה הנומרית לתוצאות נעשו בהתבסס על שתי קורלאציות למעבר החום (De Brandt). מאיורים אלו ניתן לראות כי קיימת התאמה טובה בין תחזיות הסימולציה הנומרית לתוצאות הניסוי. בנוסף ניתן להבחין ברגישות הפתרון לקורלציות השונות. בדומה לסימולציות של (1999) בנוסף ניתן להבחין ברגישות הפתרון לקורלציות השונות. בדומה לסימולציות של (1999) גם גבוה יותר מזו של Levy & Borde בנוסף ניתן לראות כי הסטייה בין התוצאות הניסויות גבוה יותר מזו של בנסף גם גם בנוסף ניתן לראות כי הסטייה בין התוצאות הניסויות גבוה לסימולציות של הסטייה גבוה יותר מזו של הסטייה גם גבוה זו. בעבודה זו.



איור המבוססות על קורלאציה איור הנומריות, המבוססות על קורלאציה איור (a) שינוי ריכוז המים שונות למעבר החום, לתוצאות ניסויות.

Baeyens et al. (1995) שייבש. תוצאות ניסויות הוצגו ע"י (1995) בחלקיק לאורך המייבש. תוצאות ניסויות הוצגו ע"י (1995)  $\left[PVC(6815), \ \rho_p = 2622 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \ \dot{m}_g = 10.52 \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ \dot{m}_p = 1.51 \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \ d_p = 140 \mu\text{m}, \ D_{dryer} = 1.25 \ m\right]$ 

## 4.3 הפרמטרים המשפיעים על תהליך הייבוש

#### 4.3.1 מעבר החום

אחד הפרמטרים החשובים המשפיעים על תהליך הייבוש הינו מעבר החום בין הפאזות ובין פאזת הגז לסביבה. על מנת להעריך את מעבר החום, סימולציית תהליך הייבוש מצריכה חישוב של מקדם מעבר החום, h, אשר בעזרתו ניתן לתאר את תהליך מעבר החום והחומר. ניתן למצוא קורלאציות אמפיריות שונות לחישוב של מקדם מעבר החום. h. בין המוצק לגז. משוואות (2.24)-(2.24) מציגות חלק מתוך הקורלאציות המצויות בספרות, אשר פותחו עבור תהליכי ייבוש שונים לדוגמא ייבוש ב-"מצע נייח", "מצע מרחף", מייבש פנאומטי וייבוש של חלקיק בודד. מכיוון שהתנאים התרמודינמיים של מייבשים מסוג "מצע נייח" ו"מצע מרחף" אינם תואמים את התנאים של מייבש פנאומטי, שימוש בקורלאציות מסוג זה להערכת מעבר החום במייבש פנאומטי, עשוי לגרום לאומדן שגוי של מעבר החום בין הפאזות. לעומת זאת הקורלאציה של Ranz/Marshal, אשר פותחה עבור ייבוש של חלקיק בודד (ניתן למצוא עבודות רבות המשתמשות בה) לוקה באומדן יתר של קצב מעבר החום, מכיוון שקירבת החלקיקים האחרים מפחיתה את קצבי מעבר החום. איורים 4.4 (a) ו- (b) מציגים השוואה בין תחזיות הסימולציות הנומריות, המבוססות על קורלציות שונות למעבר החום, כפי שניתן לראות אין אף קורלאציה אמפירית שתתאים באופן מוחלט לסימולציות תהליך הייבוש. הקורלאציות, שבעזרתן ניתן לחזות תהליך הייבוש באופן הכי קרוב לתוצאות ניסויות הן קורלאציות, אשר פותחו עבור מייבש פנאומטי, De Brandt ו- Baeyens et al. משוואות (2.25).

## virtual (added) mass -השפעת ה- 4.3.2

הביטוי השני באגף ימין של משוואה (2.17) מייצג את הכוח הנוסף הפועל על החלקיק הודות למסה הנוספת שהוא צריך להאיץ. בעבודה הנוכחית ביצענו ניסוי נומרי על מנת לבדוק את ההשפעה של הכוח הנ"ל על תהליך הייבוש. באיורים 4.5 (a) ו- (b) רואים השפעה של האפקט הנ"ל על מהירויות של הפאזות: האטה מזערית של הגז (האטה זו, שערכה כמעט ולא משתנה לאורך התהליך, מורגשת כבר מכניסה למייבש) והאטה הולכת וגוברת של החלקיקים. לעומת זאת השפעה של האפקט על תהליך מעבר החום, ומעבר המסה זניחה ולכן לא הוצגה כאן. העדר השפעה משמעותית מוסבר על ידי כך שהפרש במהירויות החזויות של החלקיקים (עם ובלי התחשבות באפקט הנ"ל) מתחיל להיות משמעותי לקראת סוף המייבש, אחרי שאינטנסיביות של תהליכי מעבר החום והחומר יורדת.



איור געל קורלאציה המבוססות על קורלאציה איור הסימולציות הנומריות, המבוססות על קורלאציה איור (b) איור למעבר החום, לתוצאות ניסויות. (a) שינוי (b) שינוי למעבר החום, לתוצאות ניסויות. (b) שינוי תכולת המים בחלקיק, שינוי שינות למעבר החום, לתוצאות ניסויות. (a) שינוי (b) שינוי שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינו (b) שינוי למעבר המים (a) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינו (b) שינוי (b) שינוי (b) שינוי (b) שינו (b)



.(b) איור החלקיקים - על מהירויות על מהירויות אפקט ה-virtual-mass איור (a) - איור איור איור (b) איור השפעת אפקט ה- $T_{wall} = 360K \rightarrow 354K$  תנאי הגבול: ירידה ליניארית  $T_{wall} = 360K \rightarrow 354K$ 

.Rocha (1988) הוצגו על ידי  

$$\left[\rho_{p} = 2622 \frac{\text{kg}}{\text{m}^{3}}, \dot{m}_{g} = 3.947 \text{ x}10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \dot{m}_{p} = 4.74 \text{ x}10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}, d_{p} = 380 \mu\text{m}, D_{dryer} = 5.25 \text{ cm}\right]$$

#### 4.4 הצגת שדה דו-ממדי

בסעיפים הקודמים (4.1 ו- 4.2) הוצגו התכונות הממוצעות בחתך הזרימה על מנת שנוכל להשוותן לתוצאות החד-ממדיות הקיימות בספרות. בהצגה זו הזנחנו את ההשפעות הדו-ממדיות שבתהליך ואת אחד החידושים שבעבודה זו. אי לכך בסעיף זה נציג את התכונות כפי שנחזו נומרית בשדה הזרימה הדו-ממדי. להבדיל מהחיזוי החד-ממדי, החיזוי הדו-ממדי מספק אינפורמציה נוספת המתארת את ההתנהגות של הזרימה בחתך ניצב לכיוון הזרימה וכתוצאה מכך ניתן לראות פילוג רדיאלי של המהירויות [איורים 4.6 (e), (f), (e) אחרות בשדה הזרימה לאורך המייבש. בעבודה הנוכחית הוצגו איורים המתארים את שדה הזרימה הדו-ממדי בשלושה סוגי גרפים. האחד, גרף המראה שינוי התכונה לאורך קווי הזרם, בתלות במרחק מציר הסימטרייה של הזרימה, לדוגמא איור 4.6 (a). השני, גרף המראה התפלגויות רדיאליות של התכונה לאורך המייבש (המייבש חולק לאורכו ל-14 קטעים שווים, כל קו מייצג התפלגות רדיאלית של התכונה במקום אחר לאורך המייבש). לדוגמא איור 4.6 (h). והשלישה, גרף המציג תכונה כלשהי במרחב הדו-ממדי לדוגמא איור 4.6 (c). נציין כי הגרפים מהסוג הראשון והשני יותר אינפורמטיביים ומאפשרים דגימת נתונים בקלות רבה, אבל הגרפים הדו-ממדיים מאפשרים ניתוח כללי של התכונות השונות בשדה הזרימה. נציין כי מהצגה דו-ממדית של שדה הזרימה ניתן להסיק מסקנות שלא ניתן לקבלן בסימולציה חד-ממדית. הסימולציה הדו-ממדית מאפשרת לעקוב אחרי תכונות של הזורם/חלקיקים בכל מקום במייבש.

על מנת לתאר את שדה הזרימה הדו-ממדי, הוחלט להציגו עבור תהליך ייבוש חול. סימולציה זו נועדה לדמות את ניסויו של Rocha (1988) עם תנאי הגבול בו קיימת ירידה ליניארית של טמפרטורת הדופן לאורך המייבש ( $T_{wall} = 360K \rightarrow 354K$ ) נזכיר כי ליניארית של טמפרטורת הדופן לאורך המייבש (לאורך המוצגו באיורים 1.3 ו- 4.2, בהן הוצגו הערכים הממוצעים של התכונות לאורך המייבש, ניתן להסיק כי תנאי הגבול בו קיימת ירידת טמפרטורת הדופן מאפשר חיזוי קרוב יותר לתוצאות ניסויות מאשר תנאי גבול אדיאבטי.

מאיורים (4.6(a,b) ניתן לראות את שדה הטמפרטורה של שתי הפאזות במייבש. ניתן מאיורים (4.6(a,b) התרמית בסמוך לדופן המייבש בפאזה גזית. קצב ירידת לראות היווצרות שכבת הגבול התרמית בסמוך לדופן המייבש ומייבש בפאזה גזית. (b) 4.6 (גוור אחר כך [איור 4.6 (b)]. טמפרטורת הזורם גבוה ברבע הראשון של המייבש ומתון יותר אחר כך [איור 4.6 תהליך מעבר החום בין הגז לחלקיקים בכניסה למייבש הנו אינטנסיבי והוא מתמתן

בהמשך. באיור 4.6 (a) רואים עליה תלולה של טמפרטורת המוצק ברבע הראשון של המייבש, לאחר מכאן נצפית ירידה קלה של טמפרטורת החלקיקים- כתוצאה מפלטת אדי המייבש, לאחר מכאן נצפית ירידה קלה של טמפרטורת החלקיקים- כתוצאה מפלטת אדי המים. ברבע אחרון של המייבש אנו שוב רואים עליה קלה של טמפרטורת המוצק, מכיוון המים. ברבע אחרון של המייבש אנו שוב רואים עליה קלה של טמפרטורת המוצק, מכיוון המים. ברבע אחרון של המייבש אנו שוב רואים עליה קלה של טמפרטורת המוצק, מכיוון המים. ברבע אחרון של המייבש אנו שוב רואים עליה קלה של טמפרטורת המוצק, מכיוון המים. ברבע אחרון של המייבש אנו שוב רואים עליה קלה של טמפרטורת המוצק, מכיוון שחימום המוצק נמשך וקצב פליטת המים התמתן. באיורים (4.6(h-j) מוצגים אותם החימום המוצק נמשך וקצב פליטת המים התמתן. באיורים (1.5 מתאר מונים לאורך ההליכים כמו באיורים (1.5 (מ.5 מום המתון בחיום לאורך המייבש וואילו ו- 4.6 לשני גרפים- 4.6 (i) המתאר תהליך במחצית השניה של המייבש. תהליך שינוי טמפרטורת החלקיקים חולק לשני גרפים- 4.6 (i) המתאר תהליך המייבש. תהליך שינוי טמפרטורת החלקיקים חולק לשני גרפים- 4.6 המייבש המתאר הליך המייבש. תהליך שינוי טמפרטורת החלקיקים חולק לשני גרפים- 1.5 (i) המתאר תהליך המייבש. המייבש וואילו ו- 4.6 (j) מתאר תהליך במחצית השניה של המייבש. חלוקה זו נעשתה על מנת למנוע התלכדות של הקווים ולשפר יכולת ניתוח של הגרף. גרפים מסוג הזה יותר מתאימים בניתוח השתנות התכונות בחתך הניצב לכיוון הזרימה, למשל התפתחות שכבות הגבול בצמוד לדופן.

באיור 4.6 (c), (d), (k), (d), (k), (d), (c) 4.6 באיור (d), (k), (d), (c) 4.6 באיור המסה בין פאזת החלקיקים לבין הגז. ירידת תכולת המים בחלקיקים [איור 4.6 (d)] מלוות בעליה של ריכוז אדי המים בגז [איור 4.6 (c)]. תהליך זה אינטנסיבי בתחילת תהליך הייבוש בכניסה למייבש ומתמתן לקראת סופו. גם כאן אנו רואים שכתוצאה מאי-אחידות של שדה הטמפרטורות והמהירויות (היווצרות שכבת הגבול בסמוך לדופן) קיימת התפלגות רדיאלית ברמות ייבוש של החלקיקים, באזור הקרוב לדופן חלקיקים נשארים לחים יותר מאשר במרכז המייבש.

באיור 4.6 (e), (f), (m), (f), (n), (f), (e) 4.6 באיור (f), (e) 4.6 באיור (f), (e) (f), (e) 4.6 המשירויות של המשתתפות בתהליך הייבוש, הגז והחלקיקים. באיור 4.6 (f) מוצג פרופיל המהירויות של המשתתפות בתהליך הייבוש, הגז והחלקיקים. באיור 6.4 (f) מוצג פרופיל המהירויות של פאזת הגז לאורך המייבש. בסמיכות לדופן המייבש מתפתחת שכבת הגבול, נזכיר הנחת הייסוד שלנו הייתה שזרימה "נעצרת" על הדופן. לעומת זאת במרכז המייבש אין שינוי הייסוד שלנו הייתה שזרימה "נעצרת" על הדופן. לעומת זאת במרכז המייבש אין שינוי מהותי במהירות הזורם. התהליך המתמיד של קליטת המסה על ידי הגז (אדי המים עוברים מחלקיקים לגז) בנוסף למפל הלחץ לאורך המייבש גורמים להאצה קלה של הזורם ואילו החיכוך בין שכבות הזורם. כוח גרר בין הפאזות וירידת טמפרטורת הגז גורמים להאטה החיכוך בין שכבות הזורם, כוח גרר בין הפאזות וירידת טמפרטורת הגז גורמים להאטה החיכוך בין שכבות הזורם, כוח גרר בין הפאזות וירידת טמפרטורת הגז גורמים להאטה החיכוך בין שכבות הזורם (f). באור מים אלו מאזנים אחד את השני לא נצפית האטה משמעותית בזרימת הגז. שדה המהירויות של החלקיקים המונעים על ידי כוחות הגרר בין הגז לחלקיקים המונעים על ידי כוחות הגרר בין הגז לחלקיקים ומאיצים מתחילת התהליך ועד סופו מוצג באיור 4.6 (f). באיור זה ניתן לראות כי ברבע הראשון של המייבש קצב ההאצה גדול יותר. גם כאן בעקבות השפעת

שדה המהירויות של פאזת הגז מתרחשת האטה של החלקיקים הנעים בסמוך לדופן של המייבש.

באיור 4.6 (g) מוצג שינוי קוטר החלקיק כתוצאה מתהליך הייבוש לאורך המייבש. גם (g) ל.6 כאן ניתן לראות את הפילוג הרדיאלי של קוטר החלקיקים (קרוב לדופן קוטר החלקיק גדול יותר).



(b) והגז (a) איור החלקיקים (a) איור לטמפרטורות החלקיקים (b) הגז (a) איור לאורך הסימולציה הנומרית שונים מציר הסימטרייה



איור (c) איור ללחות באוויר הסימולציה הנומרית ללחות באוויר (d) לאורך המייבש עבור מרחקים שונים מציר הסימטרייה



איור (e) איור למהירויות החלקיקים (f) ולמהירות פאזת איור (f) לאורך המייבש עבור מרחקים שונים מציר הסימטרייה



איור הסימטרייה שונים שונים איור המייבש עבור ארחקים שונים מציר הסימטרייה איור (g).





לאורך המייבש



איור של טמפרטורת איור להתפלגויות רדיאליות של טמפרטורת איור (j) איור (i) החלקיקים במחצית הראשונה של המייבש





והחלקיקים (n) לאורך המייבש



(p) איור (o) ופאזת החלקיקים (d) איור של איור של פאזת החלקיקים (d) איור (b) איור (d) איור של איור (d) איור של איור (d) איור של איור (d) איור של איור (d) איור



(r) איור (q) בפאזת החלקיקים (d) איור בפאזת הלחויות בפאזת הגז (f) ובפאזת הגז



(t) איור (s) ופאזת החלקיקים (s) איור של פאזת החלקיקים (s) ופאזת הגז

#### 4.5 מחקר פרמטרי

אחרי שנבחנה אמינותו של המודל המתמטי והנומרי בחיזוי תהליכי הייבוש של חלקיקי חול ו-PVC ולאחר שהוצגו התכונות השונות במרחב הדו-ממדי הוחלט לבצע מחקר פרמטרי על מנת לבחון השפעה של גורמים שונים על תהליך הייבוש. נציין שהשפעת גורמים שונים על תהליך הייבוש (חימום מוקדם של החלקיקים, זורם המייבש, מקדם מעבר החום וגודל החלקיק) נבחנה בעבודות שהוזכרו בפרק 1.3.3.

בשלב ראשון הוחלט לבחון את השפעת הלחות ההתחלתית של הגז. מאיור (a) 4.7(a) להסיק שעל ידי וויסות הלחות ההתחלתית של הגז אפשר לשלוט על משך הייבוש ואיכות החומר המיובש. השפעת החימום המוקדם על הלחות של החלקיקים מוצגת באיור (b) 4.7(b) מאיור זה ניתן לראות שחימום מוקדם של החלקיקים מאיץ את תהליך הייבוש מכיוון שלמים החמים העוטפים את החלקיק יותר קל לפרק קשרים מולקולריים מאשר למים הקרים וכן כמות האנרגיה הדרושה על מנת לאדות את המים קטנה. בשלב שני המים הקרים וכן כמות האנרגיה הדרושה על מנת לאדות את המים קטנה. בשלב שני החלט לבחון את השפעת הגודל ההתחלתי של החלקיקים. באיור (c) 4.7(c) רואים שככל שהחלט לבחון את השפעת הגודל ההתחלתי של החלקיקים. באיור (c) 4.7(c) רואים שככל החלט לבחון את השפעת הגודל ההתחלתי של חלקיקים. באיור (c) 4.7(c) רואים שככל במוחלט לבחון את השפעת הגודל ההתחלתי של חלקיקים. באיור (c) 4.7(c) רואים בכנים הנחלט לבחון התור כך המנות ליותר לייבשו, יש להשקיע יותר אנרגיה או להאריך את הוחלט לבחון התור להגיע לרמת הייבוש של חלקיק קטן. השפעתה של לחות האוויר בכניסה למייבש נבחנה אף היא. מסקנות דומות הוסקו מהמחקרים הפרמטריים על ידי 1.4-7.7

כאן הוצגה ההשפעה של חלק מהגורמים המשפיעים על תהליך הייבוש. באמצעות סימולציות מחשב ניתן לחזות השפעה של גורמים רבים אחרים כגון סוג הזורם (גזי פליטה, חנקן וכו'), ריכוז החלקיקים (יש לזקור שמודל תוקף רק לזרימה "דלילה" של חלקיקים), מהירות זרימה, גאומטריה של המייבש ועוד.

\* תוצאות הסימולציות המוצגות באיורים 4.7 (a) (d) ו- (c) התקבלו בהתבסס על תנאים
 \* של ניסוי ייבוש החול של (Rocha (1988).



(b) - איור (a) השפעת גורמים שונים על תהליך הייבוש: (b) תכולת המים בגז ו- (c)
 איור מוקדם של המוצק בכניסה למייבש על תהליך הייבוש.


איור (c). השפעת גודל החלקיק על תהליך הייבוש.

#### פרק 5- סיכום, המלצות לשיפור וכוונים לעתיד

## 5.1 סיכום

מטרת המחקר היתה פיתוח מודל תיאורטי דו-ממדי לתיאור תהליכי מעבר חום וחומר בזרימה דו-פאזית, דלילה, אי-רוטציונית ואנכית. מודל זה מאפיין את שדה הזרימה של חלקיקים לחים הנספחים על ידי גז חם בתוך מייבש פנאומטי. לאחר השלמת המודל התיאורטי נכתבה תוכנת מחשב לפתרון המודל. מטרתה של התוכנה היתה לשמש ככלי עזר לחיזוי תהליך הייבוש במייבש פנאומטי ולאפשר תכן אופטימלי של מתקני הייבוש. עזר לחיזוי תהליך הייבוש במייבש פנאומטי ולאפשר תכן אופטימלי של מתקני הייבוש. המודל המתמטי, שפותח במהלך העבודה הנוכחית, להבדיל מהמודלים החד-ממדיים הקיימים בספרות, הינו מודל דו-ממדי ובזכות זה מאפשר חיזוי תהליכים והצגת התכונות של הפאזות המשתתפות בתהליך הייבוש בכל נקודה בשדה הזרימה, ובכך מספק אינפורמציה חיונית ללימוד ותכנון תהליך הייבוש.

המודל התיאורטי מתבסס על גישת "שני זורמים"- גישה אוילרית. גישה זו מניחה שפאזת החלקיקים מתנהגת כפאזה רציפה. הנחה זו מקובלת עבור תערובת דלילה. גישה זו אפשרה לבנות מודל מתמטי, אשר כולל משוואות מאזן מסה, תנע ואנרגיה עבור שתי הפאזות (חלקיקים וגז). משוואות המאזן כללו איברי מעבר אשר ביטאו את האינטראקציות בין הפאזות. במודל זה תהליך הייבוש מחולק לשני שלבים. בשלב ראשון, מתבצע אידוי נוזל רווי מהמשטח החיצוני של החלקיק לפאזת גז, כתוצאה ממעבר החום. בשלב שני מניחים שחלקיק בנוי מליבה לחה ומעטפת מוצקה יבשה, בעלת קוטר חיצוני קבוע. תהליך הייבוש של החלקיק נשלט על ידי דיפוזיית הנוזל דרך מעטפת ועל ידי הסעת האדים לתווך גזי. במהלך האידוי הליבה הלחה מצטמקת.

כאמור לעיל לאחר פיתוח המודל התיאורטי פותח קוד נומרי שבעזרתו ניתן לחזות נומרית את תהליך הייבוש במייבש פנאומטי. הקוד הנומרי משתמש בשיטת "נפחים סופיים" - נפח הבקרה חולק לנפחים סופיים בעלי צורה טבעתית, ציר הסימטרייה של כל ה-"נפחים הסופיים" משוטף ומתלכד עם ציר הסימטרייה של המייבש. הקוד נבנה בהתאם לכללים הסופיים" משוטף ומתלכד עם ציר הסימטרייה של המייבש. הקוד נבנה בהתאם לכללים של אלגוריתם ה- SIMPLE תוך התחשבות באינטראקציות בין הפאזות בעזרת אלגוריתם של אלגוריתם ה- Spalding (1983) ו- (IPSA ו- מקוד נומרי שימש לחיזוי תהליך הייבוש של חלקיקי PVC לחים במייבש פנאומטי גדול (תעשייתי) וחלקיקי חול לחים במייבש קטן (מעבדתי). על מנת לבדוק את אמינותו של הקוד הושוו תחזיות

60

הסימולציה הנומרית לתוצאות ניסוייות ולתוצאות הסימולציות הנומריות של מודלים Levy & Borde אחרים. התקבל כי קיימת התאמה בין תחזיות המודל החד-ממדי של 1999) והמודל הדו-ממדי שפותח בעבודה זו לתוצאות ניסויות.

בשלב אחרון של המחקר בוצעה סידרה של סימולציות נומריות במטרה לבדוק את רמת ההשפעה של הפרמטרים השונים על דיוק הסימולציה ועל תהליך הייבוש. נבחנו פרמטרים שונים, כגון קורלאציות למעבר החום ואחרים. התקבל כי חימום מוקדם של חלקיקים מאיץ תהליך הייבוש, לעומת זאת הגדלת החלקיק גורמת להאטה בתהליך. על ידי שליטה בלחות של זורם המייבש ניתן לשלוט באינטנסיביות של הייבוש ובאיכות של החומר היבש. השפעתם של קורלציות השונות והפרמטרים שנבחנו הוצגו בפרק 4.

### 5.2 המלצות לשיפור וכוונים לעתיד

- המחקר הנוכחי מרחיב משמעותית יכולת למדל ולחזות תהליכים המתרחשים
  במייבש פנאומטי. המשך מחקר בתחום זה עשוי להוביל לפיתוח כלי הנדסי שישרת מהנדס העוסק בתכנון מתקן הייבוש ויאפשר לו לבנות תהליך ייבוש אופטימלי.
- המודל התיאורטי ניתן להרחיב ולהכליל אותו גם למקרים של זרימה דו-ממדית המאפשרת זרימה חוזרת ולזרימה תלת-ממדית. לבחון השפעה של אינטראקציה בין החלקיקים לעצמם ולדופן. להתחשב ברוטציה של שדה הזרימה. לבסוף ראוי לציין, כי על העבודה התיאורטית והחיזוי הנומרי להיות מגובים בעבודות ניסוייות, על מנת לאשר את נכונות המודלים התיאורטיים והתוצאות הנומריות.

#### **LITERATURE**

- Abuaf N. & Staub F. W., 1987, Drying of Liquid-Solid Slurry Droplets, Drying 86 Proceeding of the 5th International Drying Symposium, Vol. 1, pp. 227-248.
- Alvarez P.I. & Blasco R., 1999a, Pneumatic Drying Of Meals: Application Of The Variable Diffusivity Model, Drying Technology, 17(4-5), pp.791-808.
- Alvarez P.I. & Blasco R., 1999b, Flash Drying Of Fish Meals: Application With Superheated Steam: Isothermal Process, Drying Technology, 17(4-5), pp.775-790.
- Andrieu J. & Bressat R., 1982, Experimental & Theoretical Study of a Pneumatic Dryer, Proceeding of the 3rd International Drying Symposium, Vol. 2, pp. 10-19.
- Baeyens J., van Gauwbergen D. & Vinckier I., 1995, Pneumatic Drying: the use of large-scale experimental data in a design procedure, Powder Technology, Vol. 83, pp. 139-148.
- Bird R., Stewart E. & Lingfoot N., 1960, *Transport Phenomena*, John Willey and Sons. Inc., New York. USA.
- Bowen R. M., 1976, Theory of Mixtures in Continuum Physics, Ed. Eringen A. C., Academic Press, N.Y., pp. 1-127.
- Cartaxo S. & Rocha S.C.S., 1999, Object-Oriented Simulation Of Pneumatic Conveying-Application To A Turbulent Flow, Brazilian J. of Chem. Eng., 16(4), pp. 329-337.
- Cartaxo S. & Rocha S.C.S., 2001, Object-Oriented Simulation Of The Fluid-Dynamics Of Gas-Solid Flow, Powder Technology, Vol. 117, pp. 177-188.
- Clift R., Grace J. & Weber M. E., 1987, Bubbles, Drops and Particles. Academic Press, New York, USA.
- Coquel F., Al Amine K., Godlewski E. et al., 1997, A Numerical Method Using Upwind Schemes for the Resolution of Two-Phase Flows, Journal of Computational Physics, Vol. 136, pp. 272-288.

- Crowe C.T., 1982, REVIEW- Numerical Models for Dilute Gas-Particle Flows, Transactions of the ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 104, pp. 297-311
- Cundall P.A. & Strack O.D., 1979, A Discrete Numerical Model For Granular Assemblies, Geotechnique, 29, pp.47-65.
- 14. Fan L-S & Zhu C., 1998, *Principles Gas-Solid Flow*, Cambridge series in Chem. Eng.
- Maria do Carmo Ferreira, Jose T. Freire, Giulio Massrani, 2000, Homogeneous hydraulic and pneumatic conveying of solid particles, Powder Technology, Vol. 108, pp.46-54.
- Fyhr C. & Rasmuson A., 1997a, Mathematical Model Of A Pneumatic Conveying Dryer, Fluid Mechanics and Transport Phenomena, AIChE Journal, 43(11), pp.2889-2902.
- Fyhr C. & Rasmuson A., 1997b, Steam Drying Of Wood Chips In Pneumatic Conveying Dryers, Drying Technology, 15(6-8), pp. 1775-1785.
- 18. Gidaspow D., 1997, Multiphase Flow and Fluidization.
- Hyber L., Bradley M., Reed A., & Hettiaratchi K., 2000, An Investigation Into the Effect of Particle Size on Straight Pipe Pressure Gradients in Lean Phase Pneumatic Conveying, Powder Technology, Vol. 112(3), pp.235-243.
- Johansson A., Fyhr C. Rasmuson A., 1997, High temperature convective drying of wood chips with air and superheated steam, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.40, pp. 2843-2858.
- Kemp I., Bahu R. & Pasley H., 1994, Model Development And Experimental Studies Of Vertical Pneumatic Conveying Dryers, Drying Technology, 12(6), pp.1323-1340.
- Kemp I. & Oakley D., 1997, Simulation and Scale-Up of Pneumatic Conveying and Cascading Rotary Dryers, Drying Technology, 15(6-8), pp. 1699-1710.
- Levi-Hevroni D., Levy A., & Borde I., 1995, Mathematical Modeling of Drying of Liquid/Solid Slurries in Steady Sate One Dimensional Flow, Drying Technology, Vol. 13, no. 5-7, pp. 1187-1201.

- Levy A., Mason D.J., Borde I. & Levi-Hevroni D., 1998, Drying of Wet Solids Particles in a Steady-State One-Dimensional Flow, Powder Technology, Vol. 85, pp. 15-23.
- 25. Levy A. & Borde I., 1999 Steady-State One-Dimensional Flow for a Pneumatic Dryer, Chen. Eng. & Proc., Vol. 38, pp. 121-130.
- 26. Mason D. J., Marjanovic P. and Levy A., 1998, The Influence of Bends on the Performance of Pneumatic Conveying Systems, Advanced Powder Technology, Vol. 95, pp.7-14.
- Mindziul Z. & Kmiec A., 1996, Modeling Gas-Solid Flow in a Pneumatic-Flash Dryer, Drying'96 Proceeding of the 10th International Drying Symposium, Vol. A, pp. 275-282.
- 28. Mindziul Z. & Kmiec A., 1997, Modeling Gas-Solid Flow in a Pneumatic-Flash Dryer, Drying Technology, Vol. 15(6-8), pp. 1711-1720.
- 29. Kmiec A., 1997, Analysis of the Gas-Solid Flow in a Riser Reactor, Applied Mechanics and Engineering, Vol. 2(1), pp. 133-152.
- Molerus O.,1996, Overview: Pneumatic transport of solids, Powder Technology, Vol. 88, pp. 309-321.
- Ohkawa T. and Tomiyama A., 1995, Applicability of High-Order Upwind Difference Methods to the Two-Fluid Model, Advances in Multiphase Flow 1995, pp. 227-240
- 32. Pakowski Z., 1996, DryPak v.3. Program for psychometric and drying computation.
- Pan R. & Wypych P., 1992, Bend Pressure Drop In Pneumatic Conveying Of Fly Ash, Proc Powder and Bulk Solids Conf. Chicago, USA pp. 349-360.
- 34. Patankar S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York
- 35. Pelegrina A.H, Crapiste G.H, 2001, Modeling the pneumatic drying of food particles, Journal of Food Engineering, Vol. 48, pp.301-310.
- 36. Rocha S.C.S., 1988, Contribution To The Study Of Pneumatic Drying: Simulation And Influence Of Gas-Particle Heat Transfer Coefficient, Ph.D. Thesis, Sao Paulo University, Sao Paulo.

- 37. Rocha S.C.S. & Paixao A.E.A., 1996, Pseudo Two-Dimensional Model for a Pneumatic Dryer, Drying'96 Proceeding of the 10th International Drying Symposium, Vol. A, pp. 340-348.
- Saurel R. & Abgrall R., 1999, A Multiphase Godunov Method for Compressible Multifluid and Multiphase Flows, Journal of Computational Physics, Vol. 150, pp. 425-467.
- Silva M.A. & Nebra S.A., 1997, Numerical Simulation Of Drying In A Cyclone, Drying Technology, 15(6-8), pp. 1731-1741.
- 40. Silva M.A. & Correa J.L.G., 1998, Using DryPak to simulate drying process, Drying'98 Proceeding of the 11th International Drying Symposium, Vol. A, pp. 303-310.
- Spalding D.B., 1972, A Novel Finite-difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 4, pp. 551.
- 42. Spalding D.B., 1983, Developments in the IPSA procedure for numerical computation of multiphase-flow phenomena with interphase slip, unequal temperatures, etc. In: Numerical Properties and Methodologies in Heat Transfer. Hemisphere, Washington DC, pp. 421-476.
- Tanthapanichakoon W. & Srivotanai C., 1996, Analysis and Simulation of An Industrial Flash Dryer In a Thai Manioc Starch Plant, Drying'96 Proceeding of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium, Vol. A, pp. 373-380.
- Tiselj I. & Petelin S., 1997, Modeling of Two-Phase Flow with Second-Order Accurate Scheme, Journal of Computational Physics, Vol. 136, pp. 503-521.
- 45. Versteeg H.K. & Malalasekera W., 1998, An introduction to Computational Fluid Dynamics. The finite volume method, Longman Group Ltd.
- 46. Wang X. & Crawford R.J., 1997, ADE Type of Algorithms for Solving Diffusion in Non-Cartesian Coordinates, Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 119, pp. 666-672.

# ABSTRACT

Pneumatic drying, a process widely used in the chemical industry, comprises simultaneous conveying and heat and mass transfer between the particles and the hot gas. The application of this unit operation in industrial facilities requires reliable mathematical models to predict the processes taking place in the dryer. One-dimensional, two-fluid mathematical models are most often used for predicting average values of different properties of the phases in a cross section of a dryer. In the present study, a two-dimensional, two-fluid model has been developed for simulating the flow of particulate materials through a pneumatic dryer. Two-dimensional flow field interpretations provide information about properties of the continuous and dispersed phases at every point of the flow field. Our model was solved for steady-state conditions. Both axial and radial profiles could be obtained for the flow variables.

Our model is based on a two-stage drying process. In the first drying stage, heat transfer controls evaporation from the saturated outer surface of the particle to the surrounding gas. In the second stage, the particles are assumed to have a wet core and a dry outer crust. It is assumed that the evaporation of the liquid from a particle is governed by diffusion through the particle crust and by convection into the gas medium. As evaporation proceeds, the wet core shrinks as the particle dries. The numerical procedure includes discretization of the calculation domain into torus-shaped final volumes, and solving conservation equations by implementation of a SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algorithm. The numerical procedure controls coupling of phases by IPSA (Interphase Slip Algorithm). Our developed model was applied to simulate drying of wet PVC particles in a large-scale pneumatic dryer and of wet sand in a laboratoryscale pneumatic dryer. The numerical solutions were compared with the results of other numerical solutions and experimental data. There was good fit between the results obtained with the current model, experimental data of Rocha (1988) and Baeyens et al. (1995) and that of one-dimensional model of Levy & Borde (1999).

The last stage of this work comprised numerical investigation of the influence of different parameters on the drying process. Preheating of the particulate materials accelerates the drying process, but increasing the particle size leads to deceleration of the process. Through regulation of the humidity of the drying gas, the intensity of the drying process and the quality of the dried materials can be controlled.

The present investigation significantly extends our ability to simulate and predict processes in pneumatic dryers. Further investigations in this direction can lead to the development of a design tool for estimating the geometry and different operation parameters of industrial pneumatic dryers.



Ben-Gurion University of the Negev Faculty of Engineering Science Department of Mechanical Engineering

# HEAT AND MASS TRANSFER IN PNEUMATIC DRYING

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the M. Sc. degree

By Skuratovsky Ilarion

December 2002



Ben-Gurion University of the Negev Faculty of Engineering Science Department of Mechanical Engineering

# HEAT AND MASS TRANSFER IN PNEUMATIC DRYING

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the M. Sc. degree

By: Skuratovsky Ilarion

Supervised by: Dr. Avi Levy Prof. Irene Borde

Ben-Gurion University of the Negev, Faculty of Engineering Science, Department of Mechanical Engineering

December 2002