

第三章 結果與討論

3.1 含CO₂但未發泡之LDPE熔膠其發泡臨界壓力與溫度、溶解度之關係

本研究之高分子材料選用常用於押出成型之低密度聚乙烯LDPE，進行物理發泡衣架型模具之最佳化設計。茲將其材料黏度流變參數與物理性質列於表 12 [36~38, 44]。含溶解CO₂氣體之LDPE熔膠黏度求解式，可參見前述 2.1 節中式(4) 所示。

表 12. LDPE 之黏度流變參數與物理性質

Properties	LDPE
T_o (K)	423
n (-)	0.57
C_1	- 0.43
C_2	1.58
C_3	1.66
C_m (J/Kg-K)	2300
ρ_m (Kg/m ³)	750

由 2.2 節所述之Sanchez-Lacombe方程式可知含CO₂之LDPE熔膠其發泡飽和臨界壓力(P)是溫度(T)及發泡劑溶解度(w_g)的函數。利用 2.2 節所述之

方法並以程式計算Sanchez-Lacombe方程式，即可求得在 190 ~220 下，發泡劑溶解度對飽和臨界壓力的關係，如圖 7 所示。

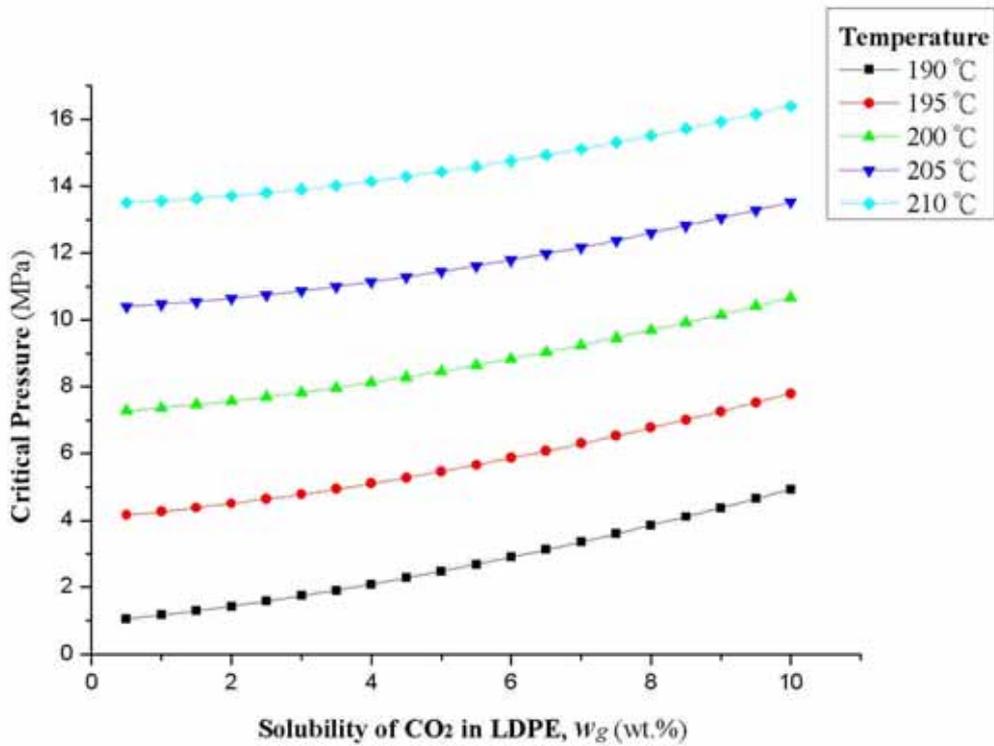


圖 7. 不同溫度下，LDPE熔膠中CO₂溶解度與飽和臨界壓力之關係

結果顯示，當發泡劑溶解度增加或是模具內溫上升時，熔膠發泡所需之臨界壓力會隨之增加。由圖 7 之結果，即可得到在各種發泡劑溶解度及模具內溫之下，膠料預發泡之臨界壓力數值。

3.2 第一種物理發泡衣架型模具之最佳化設計

3.2.1 等溫田口法之搜尋結果及最佳設計點之選取

本研究之模擬條件：高分子流量為 160 kg/hr，模具入口直徑為 5 公分，模具寬度為 150 公分，模具內溫假設為 190 等溫，CO₂溶解度 w_g 為 1 wt.%。

針對第一種物理發泡衣架型模具（如前述圖 2），搜尋 12 個因子（包括分歧管區起始長度 RMI、分歧管區末端長度 RME、限流區導角 θ 、限流區深度 H1、限流區長度 A1、鬆弛區長度 A2、鬆弛區深度 H2、壓縮區長度 A3、壓縮區起始深度 H3、分歧管區導角 β 、壓縮區導度 γ 、模唇區長度 A4），尋找訂定範圍內之最佳流量均勻度。

利用前述表 8 及表 9 所列之起始水準值，並以田口法搭配自行編寫之程式進行搜尋程序，可得到 16 個設計點，以及其出口流量均勻度與總壓力降，計算結果如表 13 所示。

表 13. 第一種模具：16 個設計點之幾何因子搜尋結果、流量均勻度與總壓力降

	RMI (cm)	RME (cm)	θ (°)	H1 (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	A3 (cm)	β (°)	γ (°)	A4 (cm)	FUI (-)	Total Pressure (MPa)
1	6.600	2.000	3.566	0.299	2.928	1.000	0.405	0.203	1.000	60.531	1.001	3.000	0.975	3.568
2	6.600	2.000	3.566	0.272	2.420	1.100	0.405	0.248	1.000	55.028	3.704	3.000	0.942	3.421
3	7.920	1.458	3.566	0.350	2.700	2.700	0.630	0.182	1.100	40.020	1.001	3.000	0.980	3.356
4	9.900	3.564	8.023	0.299	2.928	1.968	0.400	0.164	1.000	71.911	1.001	3.000	0.959	5.518
5	8.800	2.000	3.602	0.350	3.000	3.300	0.770	0.275	1.000	40.020	1.001	3.000	0.936	2.397
6	7.920	1.782	3.242	0.315	2.700	2.700	0.630	0.223	1.000	40.020	1.101	2.050	0.956	2.978
7	10.000	3.960	9.000	0.303	2.200	2.970	0.400	0.225	1.100	59.430	3.704	3.000	0.929	5.142
8	9.801	2.598	5.908	0.350	2.635	1.771	0.440	0.150	1.000	71.192	1.211	3.000	0.986	4.594
9	14.000	1.299	7.294	0.242	3.000	4.348	0.800	0.177	1.100	59.430	1.772	3.000	0.928	5.677
10	14.000	2.406	5.616	0.333	2.700	2.916	0.405	0.164	1.100	65.373	1.101	3.000	0.983	4.805
11	12.600	1.000	8.023	0.299	1.464	2.624	0.400	0.197	1.000	71.911	1.001	3.000	0.941	4.664
12	10.206	1.000	6.564	0.350	1.611	2.887	0.440	0.177	1.000	64.720	1.001	3.000	0.976	3.964
13	13.200	2.406	5.055	0.315	2.700	2.624	0.446	0.164	1.100	64.720	1.101	2.500	0.970	4.514
14	12.880	3.036	5.798	0.253	1.800	3.300	0.450	0.315	1.000	55.028	3.704	2.600	0.985	5.360
15	11.340	1.000	7.221	0.315	1.318	2.624	0.440	0.197	1.100	64.720	1.001	2.500	0.941	4.089
16	14.000	2.970	6.303	0.302	1.980	2.970	0.450	0.346	1.000	55.028	3.704	2.500	0.975	4.189

若單以出口流量均勻度高低為觀點來評估，第 8 個設計點的流量均勻度 0.986 為最佳，但是物理發泡衣架型模具之最佳化設計因素，並不單以流量均勻度作考量，還必須考慮模具內壓力變化與模具內預發泡位置。在發泡製程中，較佳的模具設計方式，是使模具內開始達到飽和臨界壓力點的預發泡位置，儘量的靠近模具出口，如此才可避免預發泡太早發生的情形。為了比較各個設計點，將流量均勻度對總壓力降作圖，如圖 8 所示。

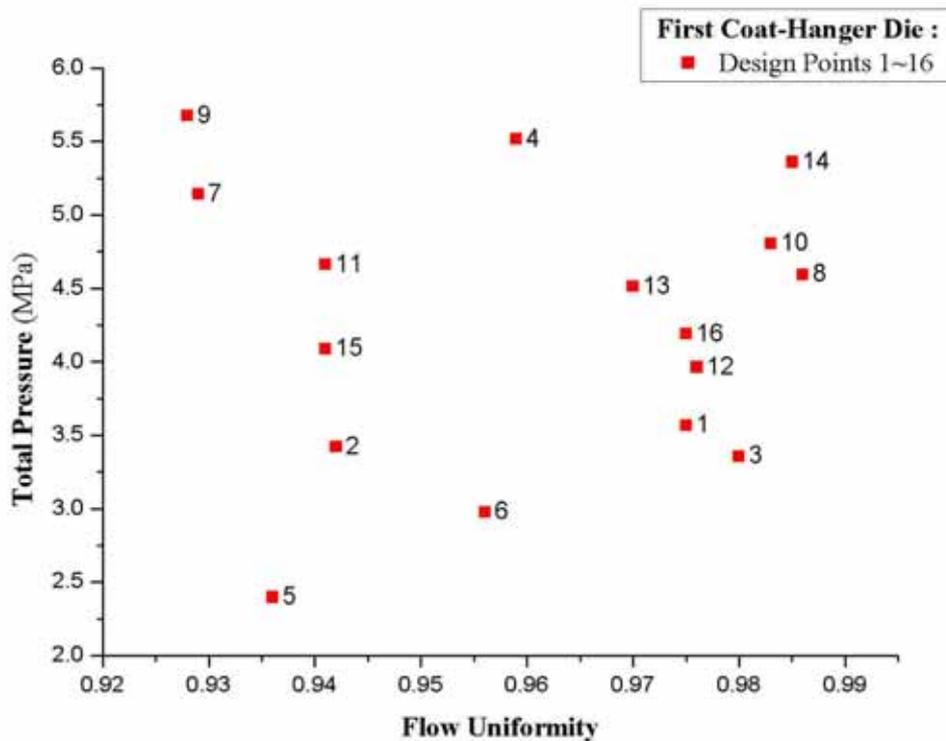


圖 8. 第一種模具：16 個設計點之出口流量均勻度與總壓力降分佈示意圖

由圖 8 中可發現出口流量均勻度與總壓力降並無明顯的相對關係，此因各設計點的幾何參數大小不盡相同。因此，為了進一步比較模具內之壓力分佈，挑出圖 8 中出口流量均勻度相對較高的設計點（包括設計點 1、3、4、8、10、12、13、14 及 16），並針對此 9 個設計點，計算沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，可得到圖 9。

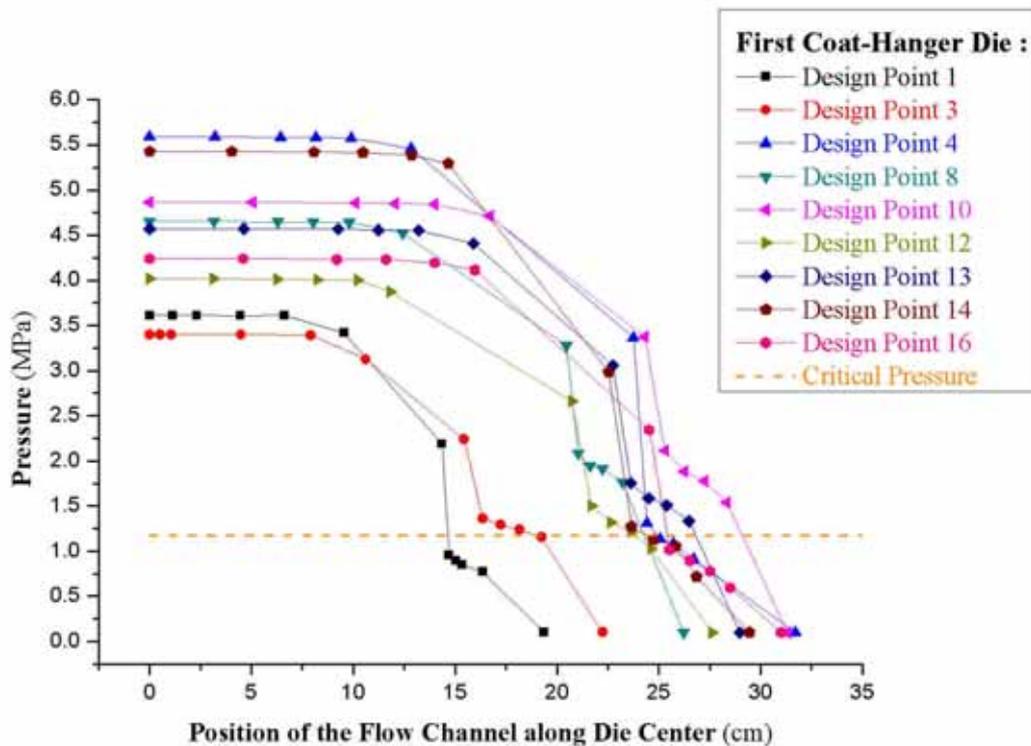


圖 9. 第一種模具：流量均勻度較佳之設計點，沿模具中心線之壓力分佈比較

圖 9 中，實線表示各設計點所得到的模具內壓力分佈，虛線則表示本操作條件下 LDPE 之發泡臨界壓力值，當模具內壓力低於臨界值時，模具內的膠料便會開始發泡。為了進一步比較各設計點預發泡位置離模具出口遠近，再針對這些設計點，分別計算沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率，如表 14 所示。

由表 14 中，可觀察出最早發泡的為設計點 1，由模具入口至預發泡位置占該流道總長之百分率為 75.59%，且在鬆弛區內已提前產生預發泡，在模具設計上應避開此狀況。發泡時間最晚且預發泡位置在模唇區的為設計

點 10，由模具入口至預發泡位置占流道總長之百分率為 92.88%，其百分率較設計點 1 增加了 17.29%。故設計點 10 為田口法搜尋出之第一種物理發泡衣架型模具最佳設計點。

表 14. 第一種模具：流量均勻度較佳之設計點，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率

Design Points	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
1	Relaxation Zone	4.725	19.355	75.59 %
3	Compression Zone	3.230	22.247	85.48 %
4	Compression Zone	6.775	31.715	78.64 %
8	Die Lip	1.930	26.223	92.64 %
10	Die Lip	2.230	31.333	92.88 %
12	Compression Zone	3.757	27.617	86.40 %
13	Die Lip	2.174	28.976	92.50 %
14	Compression Zone	5.019	29.447	82.96 %
16	Relaxation Zone	5.598	31.006	81.95 %

3.2.2 第一種模具：最佳設計點之流動分析

選定前述之設計點 10 為第一種物理發泡衣架型模具之最佳設計點，並於本節作一系列最佳設計點之流動分析探討。

再次觀察與分析沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，如圖 10 所示。由圖 10 中可觀察出，當流體進入分歧管區後，因截面積由小漸大且深度相對其他區域較大，壓力變化幅度並不大；進入狹縫區後，流道深度較狹窄，由於截面積固定，壓力呈現遞減；在進入鬆弛區後，由於其流道深度再度變大，會有釋放壓力的作用，造成壓力下降趨勢更為加快；出了鬆弛區後，當流體進入壓縮區，由於流道深度被壓縮，壓力下降趨勢有減緩的現象；進入模唇區後，壓力則線性遞減至模唇出口。

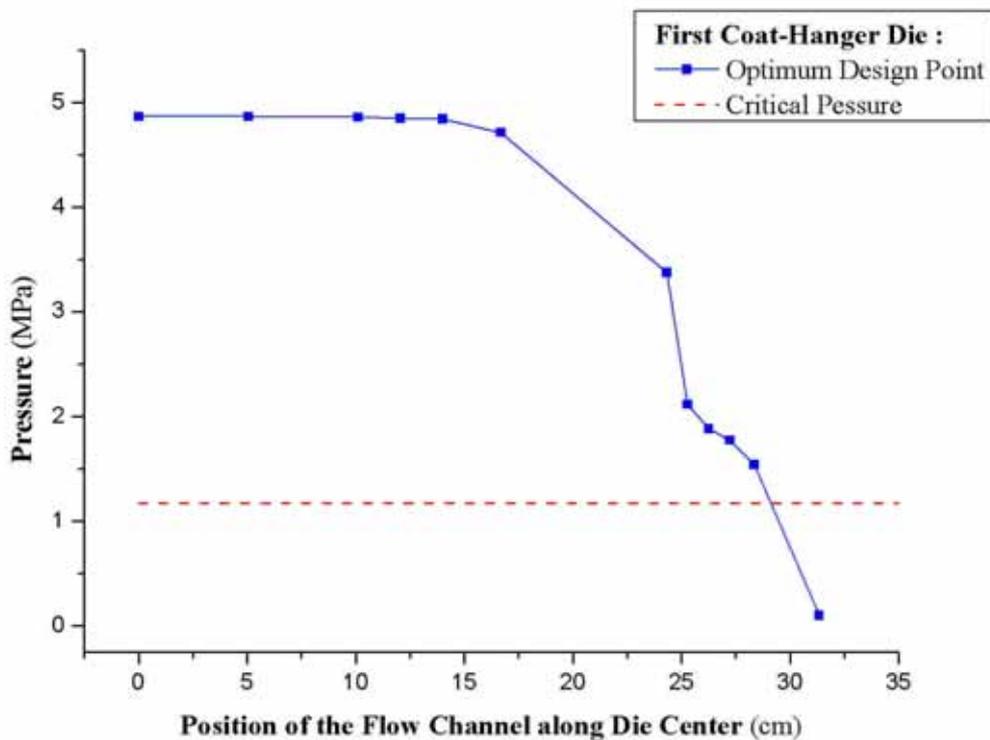


圖 10. 第一種模具：最佳設計點，沿模具中心線之壓力分佈

觀察流體在模具各區出口截面之流量均勻度變化，如圖 11 所示，比較起分歧管區內部時較低的流量均勻度，可清楚發現愈往模具出口方向，可得到愈來愈高的流量均勻度。

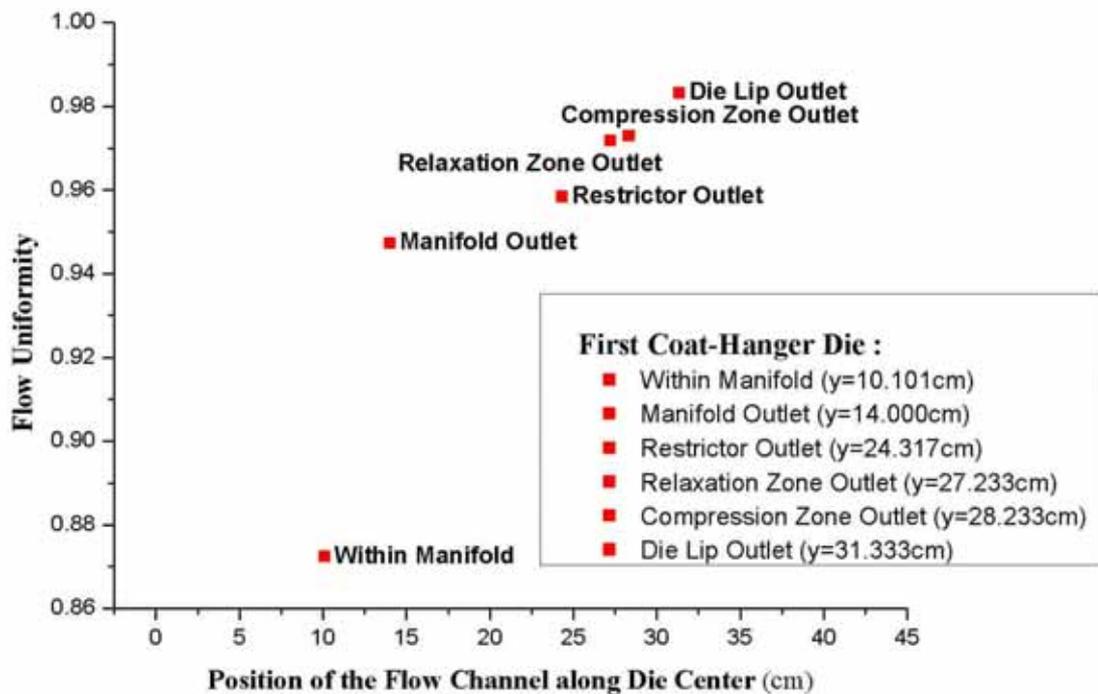
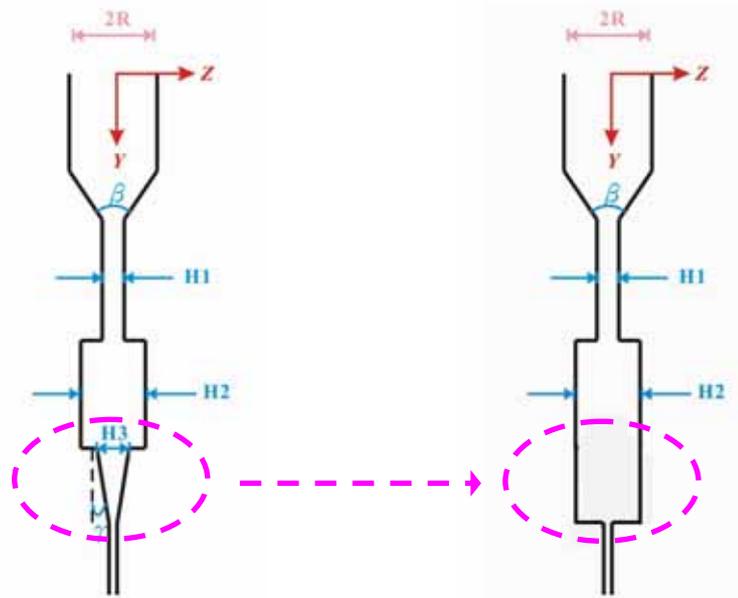


圖 11. 第一種模具：最佳設計點，模具內各區出口截面之流量均勻度

為了探討第一種模具其壓縮區之功效，將最佳設計點其幾何條件中之壓縮區改為鬆弛區之延伸（控制除壓縮區外之幾何設計條件相同）以形成一不含壓縮區之模具，如圖 12 所示。並將此不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具做一系列比較，如圖 13、表 15 與圖 14 所示。



With Compression Zone
(First Coat-Hanger Die)

Without Compression Zone

圖 12. 第一種模具：有無壓縮區之幾何比較示意圖

圖 13 為不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之壓力分佈比較，可看出本研究設計之第一種模具可增加總壓力降，延遲預發泡時間，達到使膠料發泡位置更接近模具出口位置的目的。

表 15 為不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之預發泡發生位置比較，可觀察出第一種模具之壓縮區設計，其模具入口至預發泡位置占流道總長之百分率，較不含壓縮區之模具增加了 7.57%，延後了預發泡時間。

圖 14 為不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之出口截面流量分佈比較，可看出本研究設計之第一種模具其出口流量均勻度為 0.983，優於不含壓縮區之模具其出口流量均勻度 0.965。

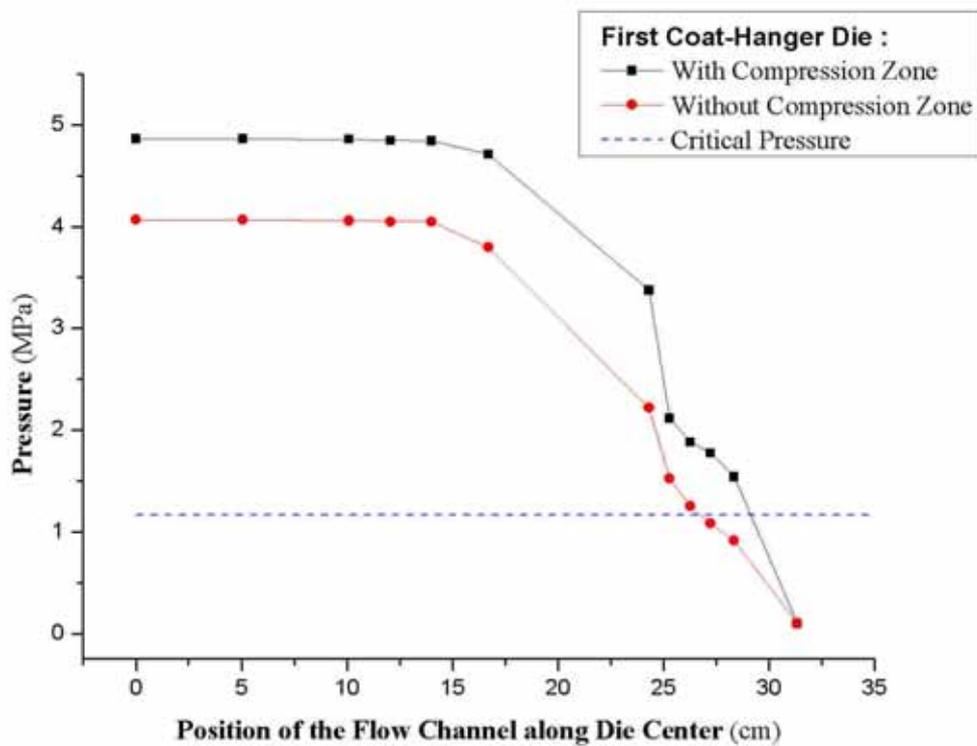


圖 13. 不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具之模具中心線壓力分佈比較



表 15. 不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置占流道總長之百分率 (%)
With Compression Zone	Die Lip	2.230	31.333	92.88 %
Without Compression Zone	Relaxation Zone	4.604	31.333	85.31 %

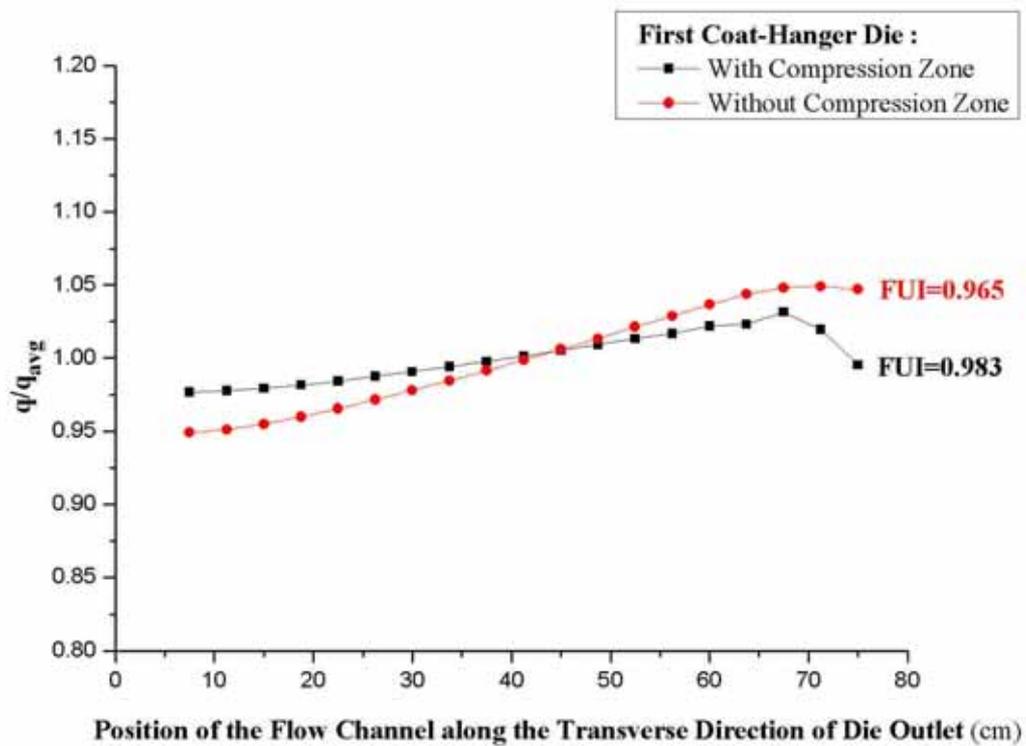


圖 14. 不含壓縮區之模具與第一種物理發泡型模具出口截面之流量分佈比較



3.2.3 第一種模具：改變模具幾何形狀之分析比較

模具幾何形狀對壓力變化與發泡位置影響甚鉅，本節針對第一種模具之最佳設計點，探討改變模具幾何形狀對分析結果之影響。

(A) 改變壓縮區之導角角度

由圖 15 可知壓縮區之導角角度 γ 對總壓力降具有顯著的影響，當壓縮區之導角角度 γ 增加，總壓力降則隨之增大。這是因為導角角度 γ 增加時，會造成壓縮區的空間愈為狹窄，更限制了流體流動而使流動阻力增大，造成壓力增加；另外，由於壓力增加，由表 16 中亦可觀察出增加導角角度 γ 可使預發泡時間延後，使預發泡位置接近模具出口。

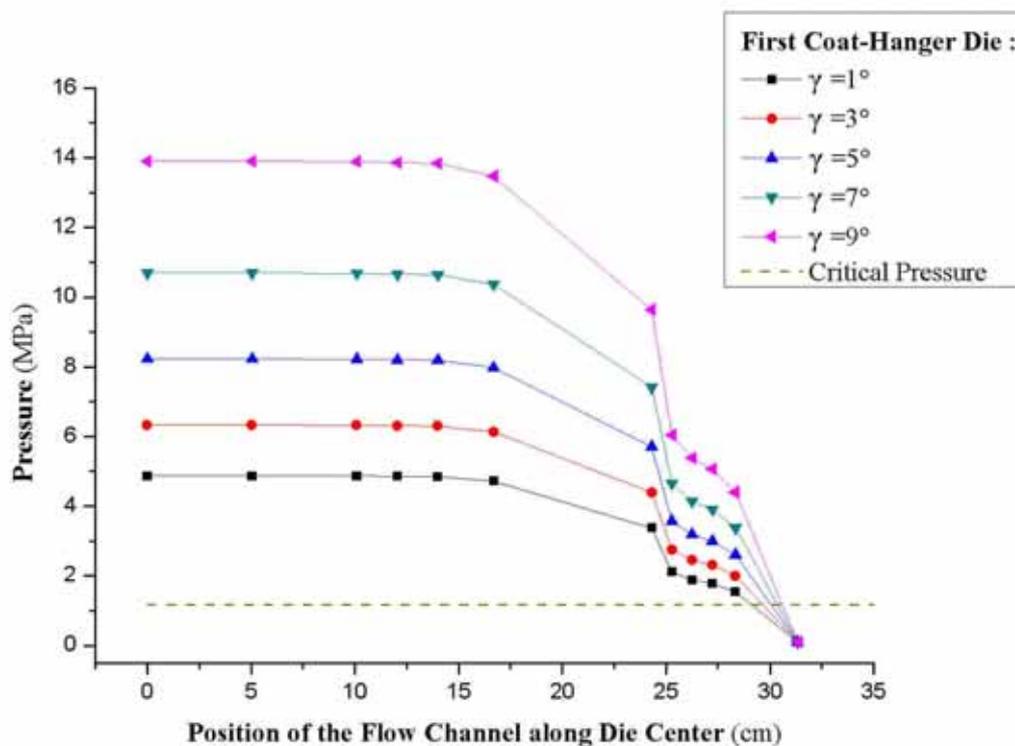


圖 15. 第一種模具：改變壓縮區之導角角度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 16. 第一種模具：改變壓縮區之導角角度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
$\gamma = 1^\circ$	Die Lip	2.230	31.333	92.88 %
$\gamma = 2^\circ$	Die Lip	1.689	31.333	94.61 %
$\gamma = 3^\circ$	Die Lip	1.283	31.333	95.90 %
$\gamma = 4^\circ$	Die Lip	0.978	31.333	96.88 %
$\gamma = 5^\circ$	Die Lip	0.747	31.333	97.62 %

(B) 改變壓縮區之長度

由圖 16 可知壓縮區之長度 A3 對總壓力降具有顯著的影響，當壓縮區之長度 A3 增加，總壓力降則隨之增大。這是因為壓縮區之長度 A3 增加時，會間接導致壓縮區出口深度變小，亦即會使得模唇區深度變小，流道變窄再加上流道增長，因而造成了壓力的增加；另外，由於壓力增加，由表 17 中亦可觀察出增加壓縮區長度可使預發泡時間延後，使預發泡位置接近模具出口。

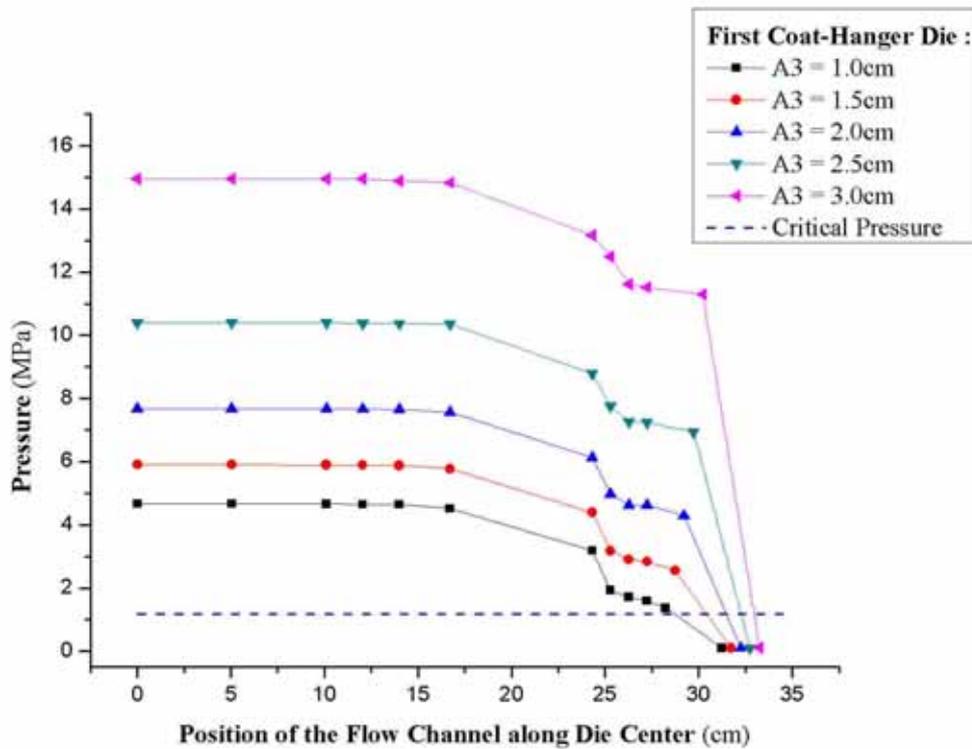


圖 16. 第一種模具：改變壓縮區之長度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 17. 第一種模具：改變壓縮區之長度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
A3 = 1.0 cm	Die Lip	2.546	31.233	91.85 %
A3 = 1.5 cm	Die Lip	1.308	31.733	95.88 %
A3 = 2.0 cm	Die Lip	0.767	32.233	97.62 %
A3 = 2.5 cm	Die Lip	0.470	32.733	98.56 %
A3 = 3.0 cm	Die Lip	0.287	33.233	99.14 %

(C) 改變壓縮區之起始深度

由圖 17 可知壓縮區之起始深度 H3 對總壓力降具有顯著的影響，當壓縮區之起始深度 H3 增加，總壓力降則會隨之遞減。這是因為壓縮區之起始厚度 H3 增加時，會造成壓縮區的空間增大，使得融膠往出口方向流動之流動阻力變小，造成壓力減低；另外，由於壓力減低，由表 18 中亦可觀察出增加壓縮區起始深度會導致預發泡時間提前，也導致發泡位置遠離了模具出口。

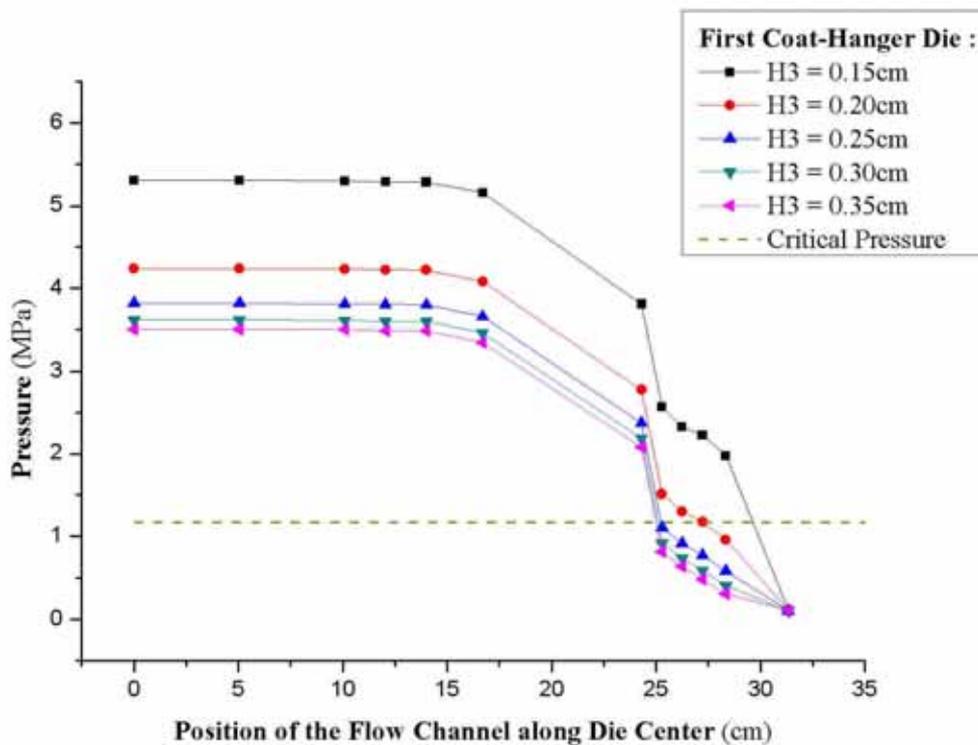


圖 17. 第一種模具：改變壓縮區之起始深度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 18. 第一種模具：改變壓縮區之起始深度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
H3 = 0.15 cm	Die Lip	1.713	31.333	94.53 %
H3 = 0.20 cm	Compression Zone	4.091	31.333	86.94 %
H3 = 0.25 cm	Relaxation Zone	6.092	31.333	80.56 %
H3 = 0.30 cm	Relaxation Zone	6.237	31.333	80.09 %
H3 = 0.35 cm	Relaxation Zone	6.316	31.333	79.84 %

(D) 改變鬆弛區之長度

由圖 18 可知鬆弛區之長度 A2 會略為影響總壓力降，當鬆弛區之長度 A2 增加，總壓力降則隨之略增。這是因為當鬆弛區之長度 A2 增加時，流道略為增長，因而造成了壓力的增加；另外，由於壓力增加，由表 19 中亦可觀察出增加鬆弛區長度可使預發泡時間略為延後，使預發泡位置接近模具出口。惟壓力增加幅度與預發泡位置延後幅度不如改變壓縮區長度來的明顯。

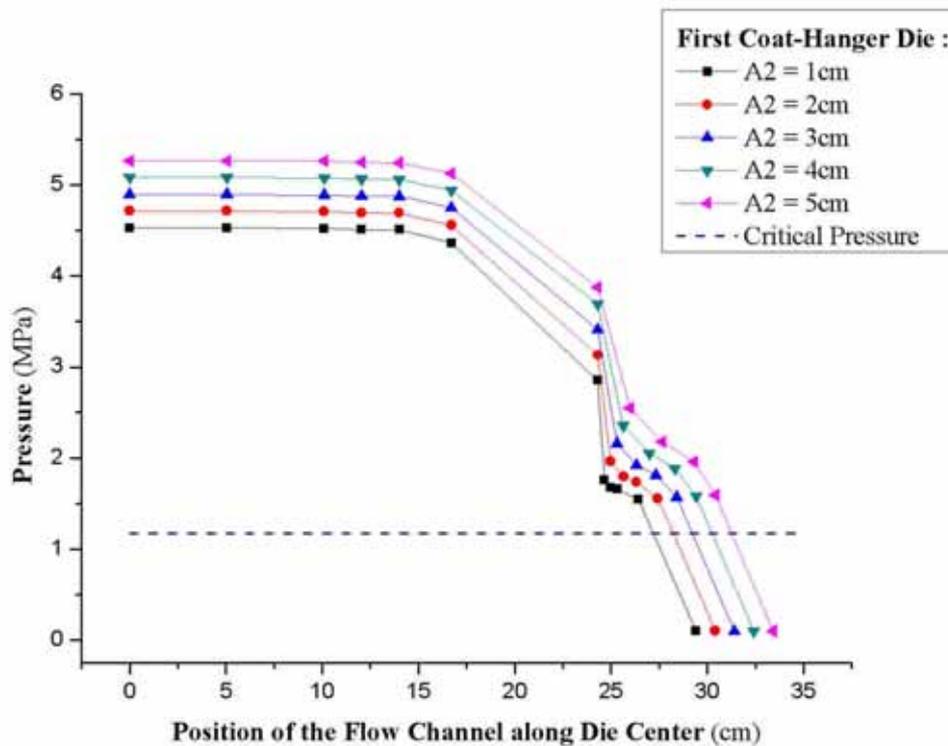


圖 18. 第一種模具：改變鬆弛區之長度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 19. 第一種模具：改變鬆弛區之長度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
A2 = 1 cm	Die Lip	2.223	29.417	92.44 %
A2 = 2 cm	Die Lip	2.203	30.417	92.75 %
A2 = 3 cm	Die Lip	2.186	31.417	93.04 %
A2 = 4 cm	Die Lip	2.170	32.417	93.30 %
A2 = 5 cm	Die Lip	2.155	33.417	93.55 %

(E) 改變鬆弛區之深度

由圖 19 可知鬆弛區之深度 H_2 會略為影響總壓力降，當鬆弛區深度 H_2 增加，總壓力降則會隨之略為遞減。這是因為鬆弛區深度 H_2 增加時，會造成鬆弛區的空間增大，使得融膠往出口方向流動之流動阻力變小，造成壓力減低；另外，由於壓力減低，由表 20 中亦可觀察出，增加鬆弛區深度會導致預發泡時間提前，也導致預發泡位置遠離了模具出口。惟壓力減低幅度與預發泡位置提前幅度不如改變壓縮區深度來的明顯。

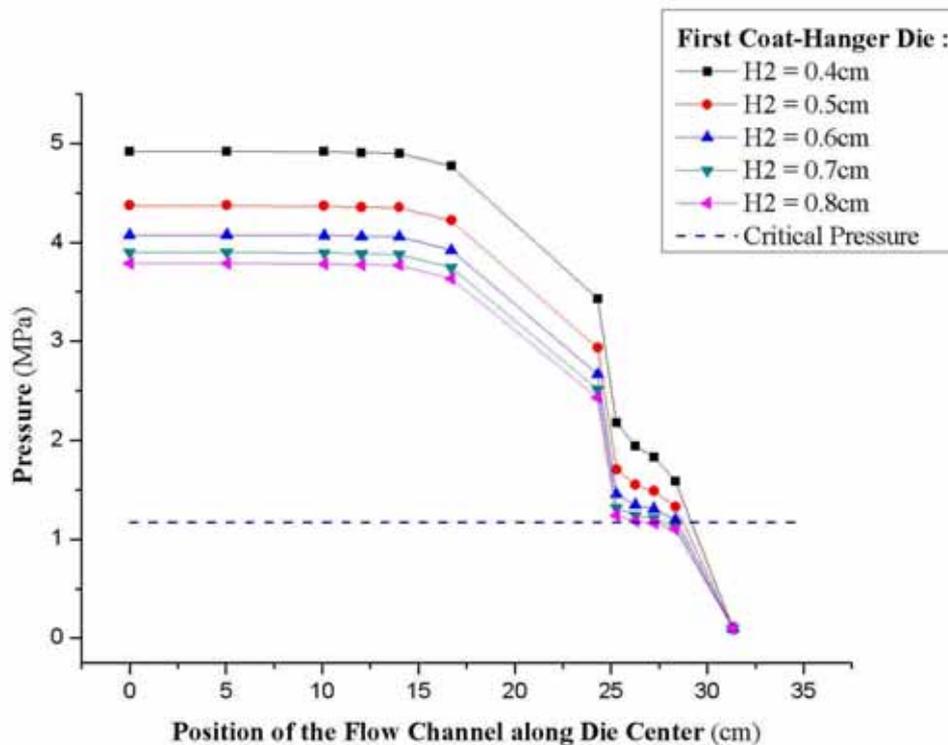


圖 19. 第一種模具：改變鬆弛區之深度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 20. 第一種模具：改變鬆弛區之深度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
H2 = 0.4 cm	Die Lip	2.161	31.333	93.10 %
H2 = 0.5 cm	Die Lip	2.618	31.333	91.64 %
H2 = 0.6 cm	Die Lip	2.933	31.333	90.64 %
H2 = 0.7 cm	Compression Zone	3.579	31.333	88.58 %
H2 = 0.8 cm	Relaxation Zone	4.499	31.333	85.64 %



3.2.4 第一種模具：改變氣體發泡劑溶解度之分析比較

氣體發泡劑溶解度對壓力變化與發泡位置影響甚鉅，本節針對第一種模具之最佳設計點，探討改變模具幾何形狀對分析結果之影響。

由圖 20 可知氣體發泡劑溶解度 w_g 對總壓力降具有顯著的影響，當氣體發泡劑溶解度 w_g 增加，總壓力降則會隨之遞減，至於發泡臨界壓力值卻隨之遞增。這是因為氣體發泡劑溶解度 w_g 的增加會降低黏度值，造成流動阻力變小，因而造成較低的壓力降值；然而氣體發泡劑溶解度 w_g 的增加也會提高發泡臨界壓力值，熔膠中氣體發泡劑含量愈多，預發泡愈容易提前發生，也導致發泡位置遠離了模具出口，如表 21 所示。

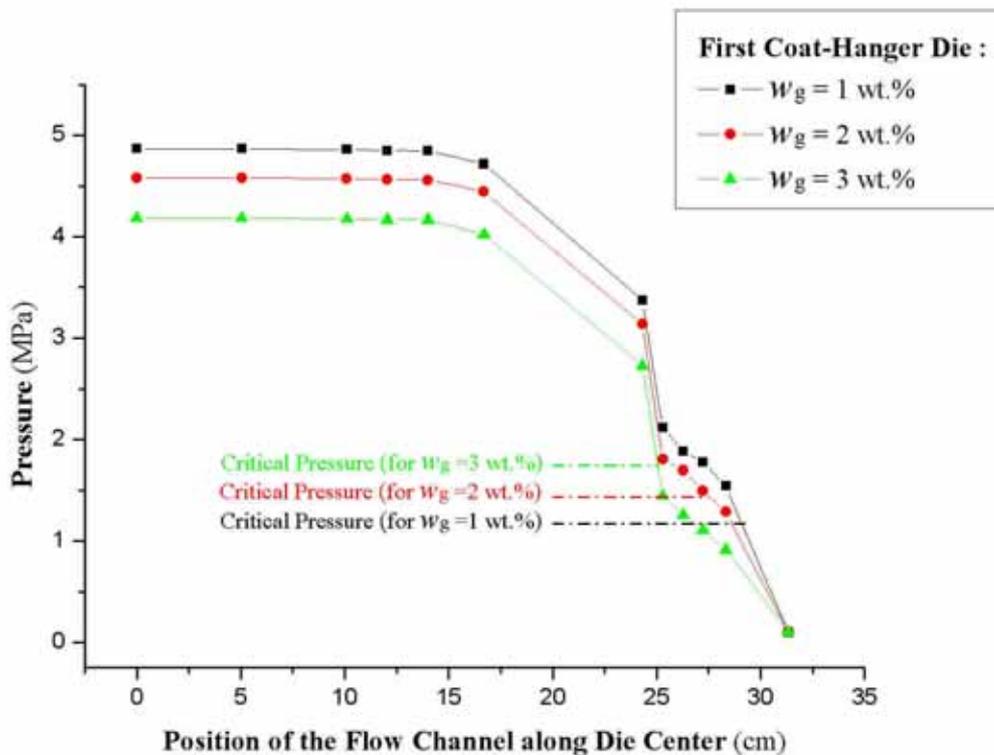


圖 20. 第一種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 21. 第一種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
$w_g = 1 \text{ wt.}\%$	Die Lip	2.230	31.333	92.88 %
$w_g = 2 \text{ wt.}\%$	Compression Zone	3.768	31.333	87.97 %
$w_g = 3 \text{ wt.}\%$	Relaxation Zone	6.270	31.333	79.99 %

圖 21 為各種氣體發泡劑溶解度 w_g 下之第一種模具出口截面流量分佈比較，可看出隨著氣體發泡劑含量的增加，出口均勻度會隨之遞減。

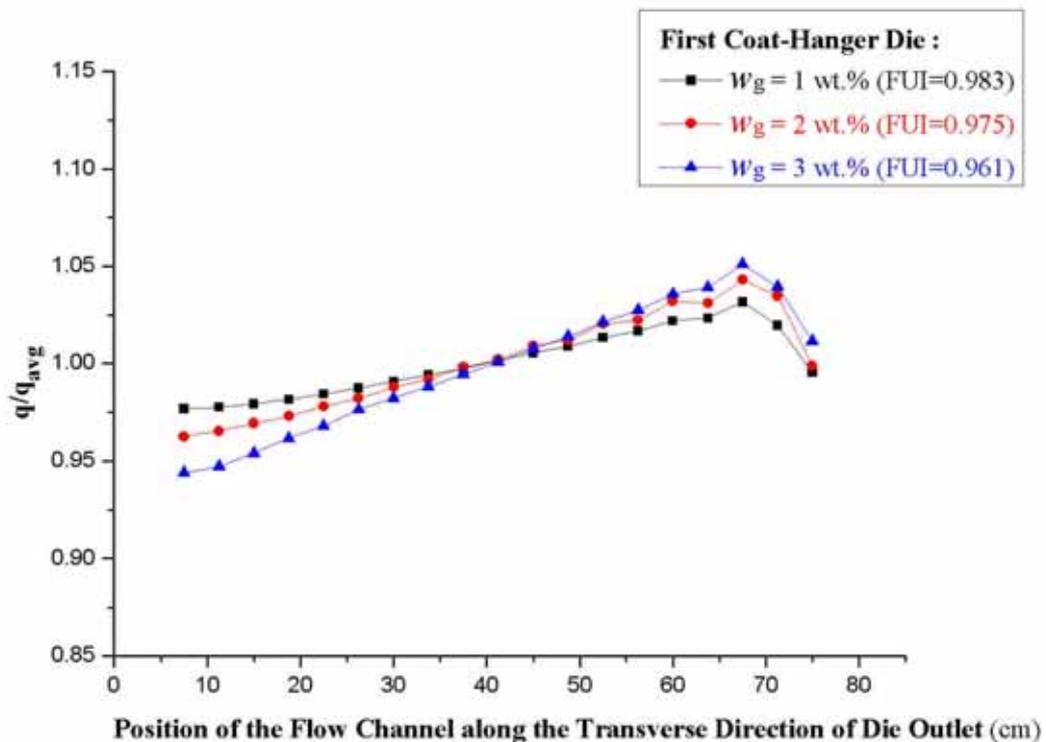


圖 21. 第一種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，出口截面之流量分佈比較

3.2.5 考慮溫度效應下之非等溫流動分析

前述 3.2.1 至 3.2.4 節將模具內溫假設為 190 °C 等溫，探討第一種物理發泡衣架型模具內之等溫流動分析，本節則探討考慮溫度效應下之非等溫流動分析。將模具入口截面料溫以及模具壁溫設定為 190 °C，其餘模擬條件同於前述第一種模具之等溫模式最佳設計點，並將非等溫流動與等溫流動作一系列比較。

由圖 22 可觀察到在考慮溫度效應後，壓力分佈僅略低於前述之等溫流動分析結果，因此對於等溫流動狀態之假設下所做出的第一種模具最佳化設計亦可適用於真實的非等溫情況。總壓力降會下降的原因，主要是因為在不考慮溫度效應狀況下時，做了固定溫度的黏度值假設；但是實際考慮非等溫流動的情況下，溫度的上升會降低黏度，造成流動阻力變小，因而造成較低的壓力降。

圖 23 可觀察出流體於第一種模具中心線之內部溫度變化情形。當流體流經限流區及壓縮區時會有較明顯之升溫現象，這是因為當熔膠流到厚度較狹小的區域時，因剪切率增加而導致黏滯熱亦隨之增加，而造成的結果。由此模具中心線溫度分佈圖亦可觀察出，入口端的 190 °C 料溫，至出口時已升溫至 204.5 °C。

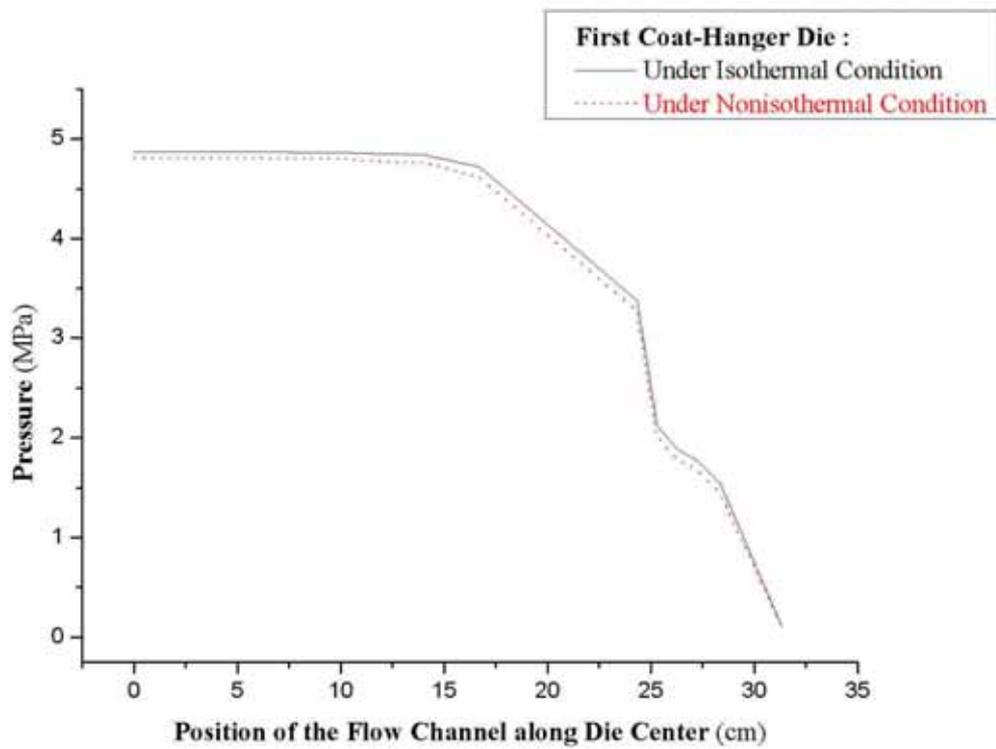


圖 22. 第一種模具：考慮等溫與非等溫情況下，沿模具中心線之壓力分佈比較

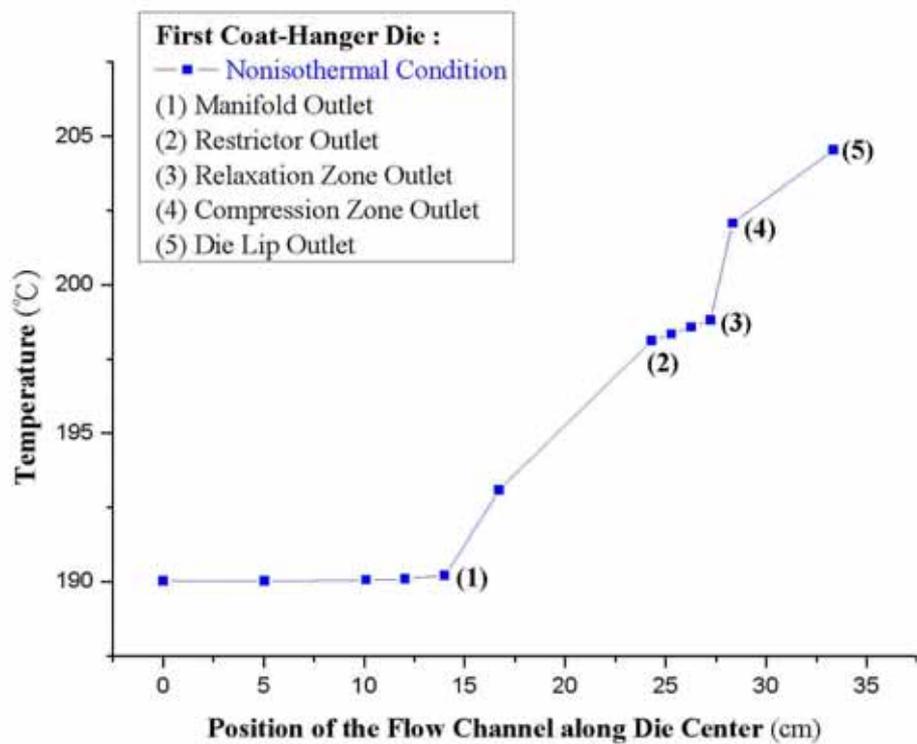


圖 23. 第一種模具：考慮非等溫情況下，沿模具中心線之溫度分佈

圖 24 為不同壓力下之 LDPE 熔膠中自由體積分率 f 對溫度變化之關係，由圖中可觀察出自由體積分率 f 對溫度變化之敏感性並不大。又由 2.1 節式(4) 可知無論等溫與非等溫系統其剪切黏度 η 隨自由體積分率 f 值而變，因 f 對溫度變化之敏感性不大，故溫度變化對 LDPE 熔膠之剪切黏度 η 值及流動阻力影響亦有限，說明了為何非等溫流動系統雖升溫明顯，圖 22 中之壓力分佈卻僅略低於等溫流動系統壓力值之原因。

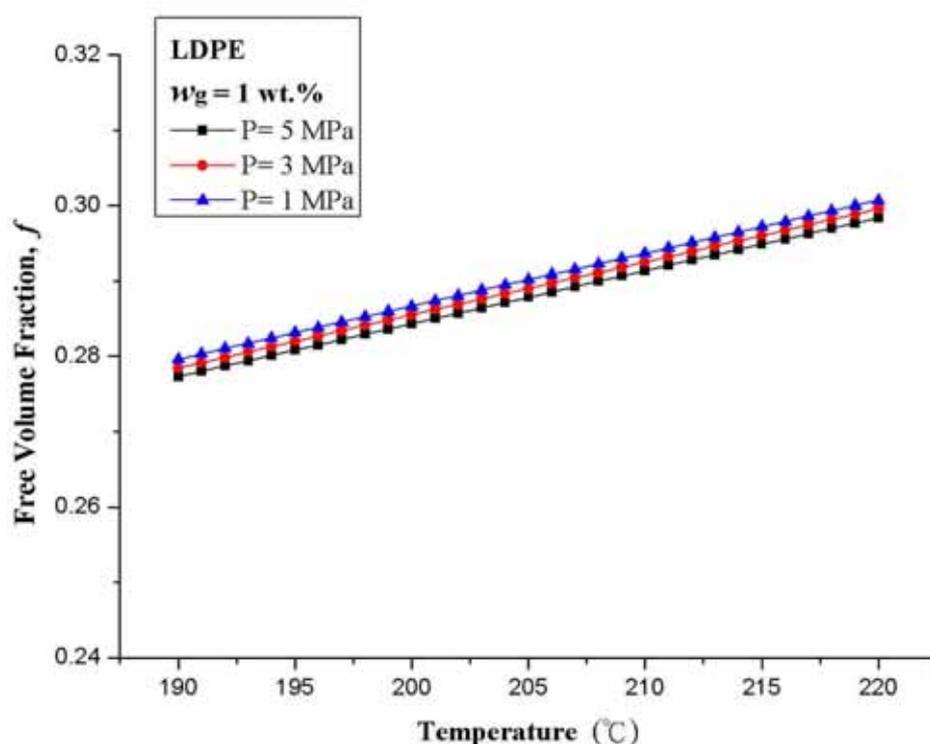


圖 24. 不同壓力下，LDPE 熔膠中自由體積分率與溫度變化之關係

圖 25 可觀察到模具內部在各區出口截面之溫度分佈，比較起分歧管區出口時較不均一的溫度分佈，可清楚發現愈往模具出口方向，可得到愈來愈

愈高的溫度均勻度。其中，流體於模具出口處之溫度分佈，溫度均勻度值可達到 0.9986。

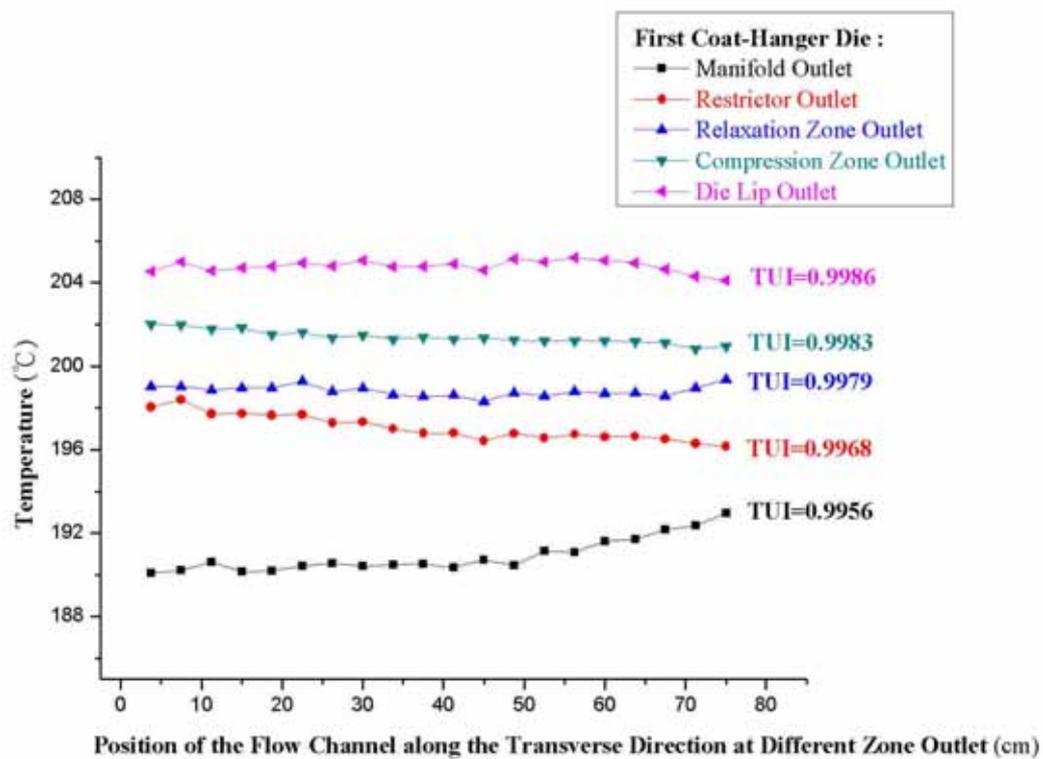


圖 25. 第一種模具：考慮非等溫情況下，模具內各區出口截面沿寬度方向之溫度分佈

3.3 第二種物理發泡衣架型模具之最佳化設計

3.3.1 等溫田口法之搜尋結果及最佳設計點之選取

本研究之模擬條件：高分子流量為 160 kg/hr，模具入口直徑為 5 公分，模具寬度為 150 公分，模具內溫假設為 190 等溫，CO₂溶解度為 1 wt.%。

針對第二種物理發泡衣架型模具（如前述圖 3），搜尋 9 個因子（包括分歧管區起始長度 RMI、分歧管區末端長度 RME、限流區導角 θ 、限流區深度 H1、限流區長度 A1、壓縮區長度 A2、分歧管區導角 β 、壓縮區導角 γ 、模唇區長度 A3），尋找訂定範圍內之最佳出口流量均勻度。利用前述表 10 及表 11 所列之起始水準值，並以田口法搭配程式進行搜尋程序，可得到 12 個設計點，以及其出口流量均勻度與總壓力降，計算結果如表 22 所示。

表 22. 第二種模具：12 個設計點之幾何因子搜尋結果、流量均勻度與總壓力降

	RMI (cm)	RME (cm)	θ (°)	H1 (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	β (°)	γ (°)	A3 (cm)	FUI (-)	Total Pressure (MPa)
1	10.000	2.911	1.436	0.205	2.100	1.000	40.541	1.001	3.000	0.980	4.303
2	8.800	2.312	1.243	0.237	2.874	2.000	60.852	1.321	3.000	0.957	4.901
3	7.920	2.000	5.245	0.264	3.874	1.300	40.841	1.321	3.000	0.927	6.351
4	8.600	3.244	2.143	0.282	3.843	1.254	60.852	2.839	2.600	0.925	4.253
5	8.647	3.229	1.436	0.251	4.227	2.750	40.342	1.001	3.000	0.962	5.848
6	8.600	3.200	2.143	0.274	2.743	1.254	60.851	1.838	3.000	0.944	3.662
7	12.492	2.911	1.797	0.272	3.123	1.000	76.762	2.838	2.823	0.942	3.484
8	14.000	2.598	1.797	0.234	4.191	1.173	40.040	1.154	3.000	0.982	4.936
9	14.000	2.154	1.001	0.233	4.691	1.254	60.824	1.154	3.000	0.979	4.600
10	14.000	3.244	5.329	0.246	3.843	1.173	42.707	1.265	3.000	0.945	6.967
11	12.368	2.745	2.121	0.253	3.652	1.342	46.287	2.174	2.786	0.938	4.135
12	13.492	2.911	2.797	0.252	4.122	1.238	40.744	1.342	3.000	0.969	5.084

若單以出口流量均勻度高低為觀點來評估，第 8 個設計點的流量均勻度 0.982 為最佳，但同於 3.2.1 節所述之觀念，一個最佳化的物理發泡衣架型模具，並不單以針對流量均勻度作考量，還必須考慮到模具內壓力變化與模具內預發泡位置。為了比較各個設計點，將出口流量均勻度對總壓力降作圖，如圖 26 所示。

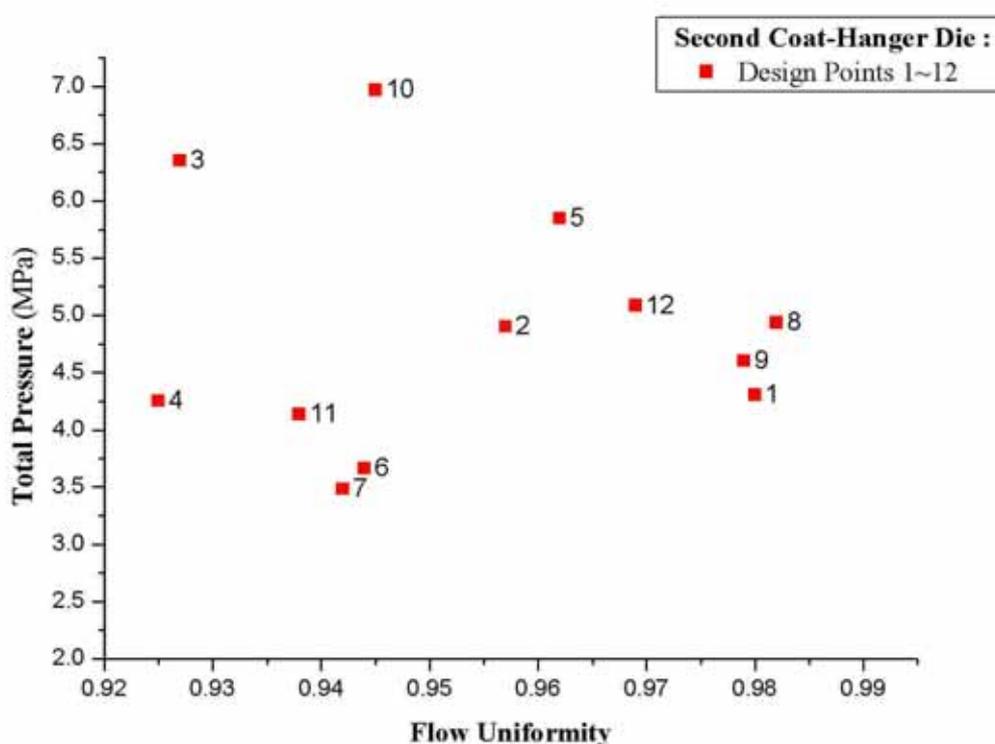


圖 26. 第二種模具：12 個設計點之出口流量均勻度與總壓力降分佈示意圖

由圖 26 中可發現出口流量均勻度與總壓力降並無明顯的相對關係，此因各設計點的幾何參數大小不盡相同。因此，為了進一步比較模具內之壓力分佈，挑出圖 26 中出口流量均勻度相對較高的設計點(包括設計點 1、2、5、8、9、10 及 12)，並針對此 7 個設計點，計算沿模具中心線由入口往出

口方向之壓力變化，可得到圖 27。

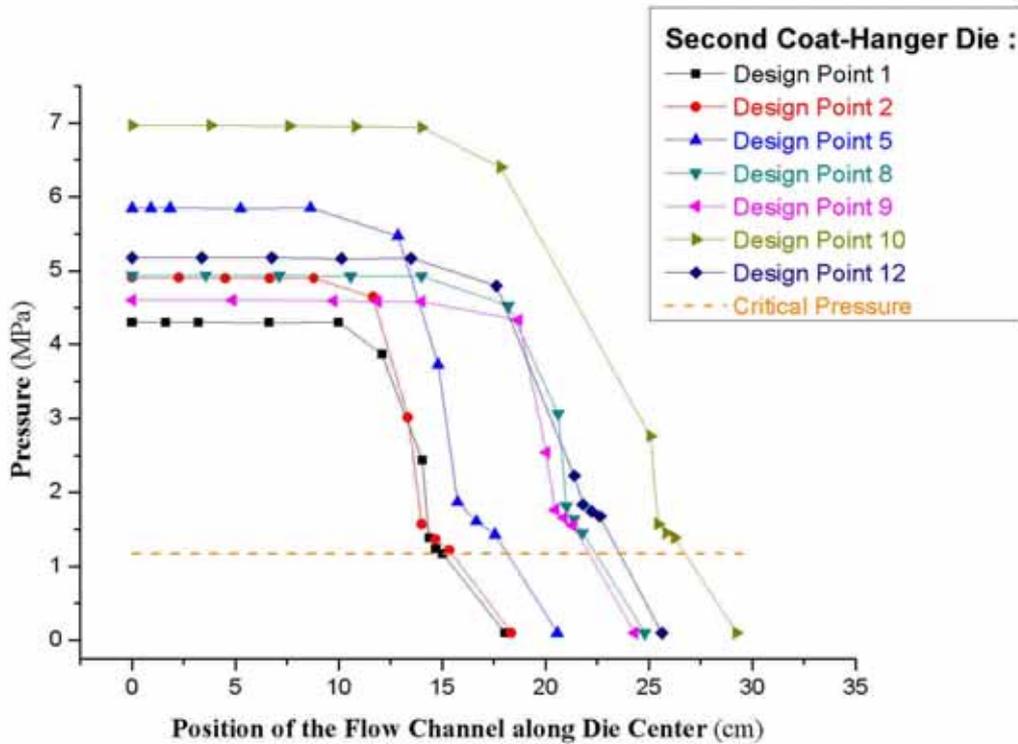


圖 27. 第二種模具：流量均勻度較佳之設計點，沿模具中心線之壓力分佈比較

圖 27 中，實線表示各設計點所得到的模具內壓力分佈，虛線則為本操作條件下 LDPE 之發泡臨界壓力值，當模具內壓力低於臨界值時，模具內的膠料便會開始發泡。為了進一步比較各設計點預發泡位置離模具出口遠近，再針對這些設計點，分別計算沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率，如表 23 所示。

由表 23 中，可觀察出最早發泡的為設計點 1，由模具入口至預發泡位置占該流道總長之百分率為 83.15%，且在壓縮區內已提前產生預發泡，在

模具設計上應避開此狀況。發泡時間最晚且預發泡位置在模唇區的為設計點 12，由模具入口至預發泡位置占流道總長之百分率為 92.05%，其百分率較設計點 1 增加了 8.90%。故設計點 12 為田口法搜尋出之第二種物理發泡衣架型模具最佳設計點。

表 23. 第二種模具：流量均勻度較佳之設計點，沿模具中心線之預發泡發生區域及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率

Design Points	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
1	Compression Zone	3.039	18.042	83.15%
2	Die Lip	2.877	18.354	84.32%
5	Die Lip	2.420	20.567	88.24%
8	Die Lip	2.375	24.794	90.42%
9	Die Lip	2.209	24.297	90.91%
10	Die Lip	2.489	29.240	91.49%
12	Die Lip	2.038	25.636	92.05%

3.3.2 第二種模具：最佳設計點之流動分析

選定前述之設計點 12 為第二種物理發泡衣架型模具之最佳設計點，並再次觀察與分析沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，如圖 28 所示。由圖 28 中可觀察出，當流體進入分歧管區後，因截面積由小漸大且深度相對其他區域較大，壓力變化幅度並不大；進入狹縫區後，流道深度較狹窄，由於截面積固定，壓力呈現遞減；出了狹縫區後，與第一種模具相較之下，本模具沒有設計鬆弛區，而使流體直接進入壓縮區，由於流道深度被壓縮，壓力下降趨勢因而有減緩的現象；進入模唇區後，壓力則線性遞減至模唇出口。

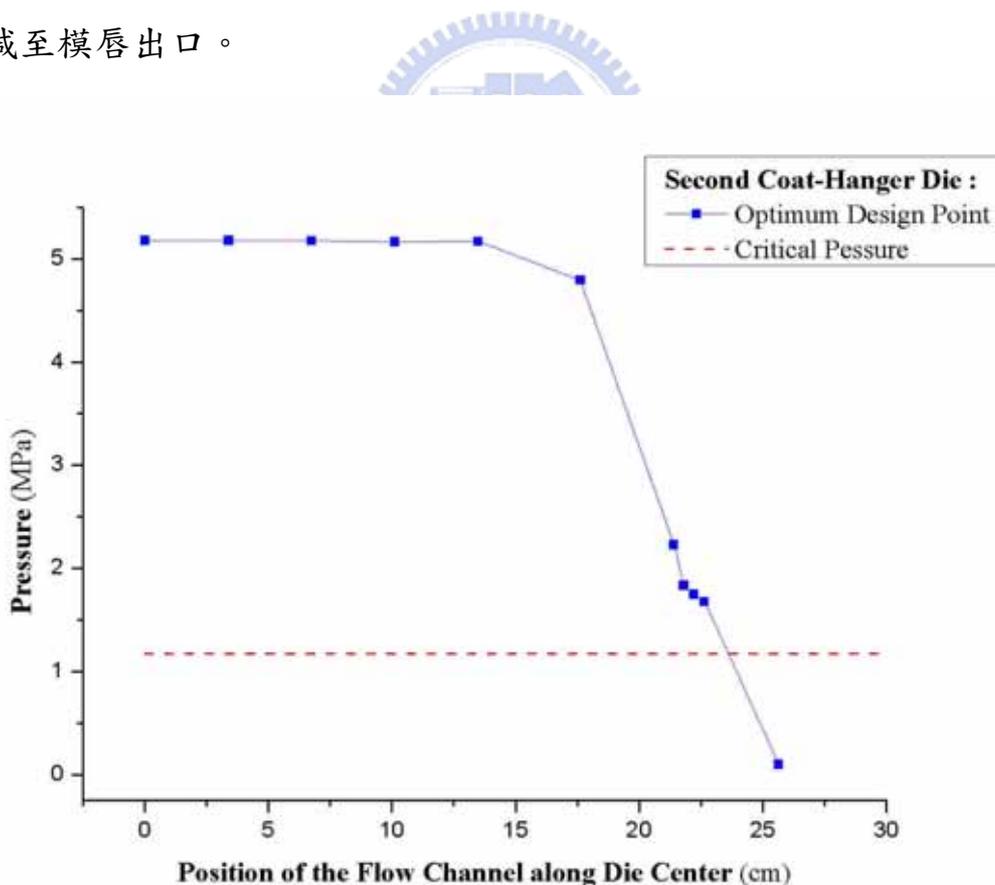


圖 28. 第二種模具：最佳設計點，沿模具中心線之壓力變化

觀察流體在模具各區出口截面之流量均勻度變化，如圖 29 所示，比較起分歧管區內部時較低的流量均勻度，可清楚發現愈往模具出口方向，可得到愈來愈高的流量均勻度。

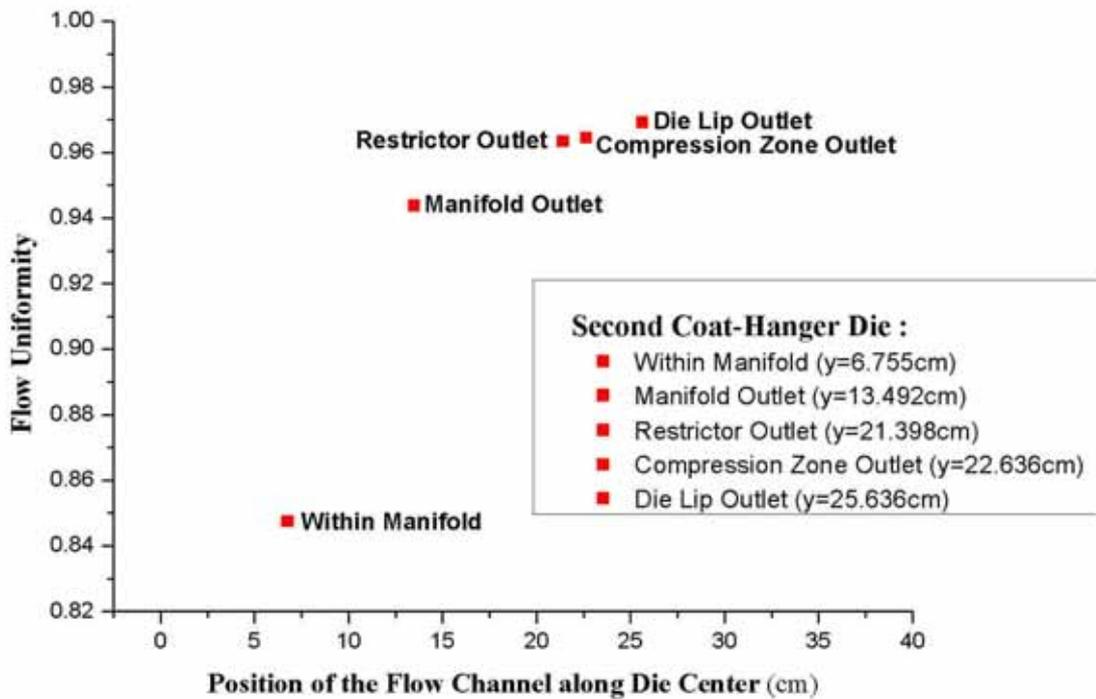
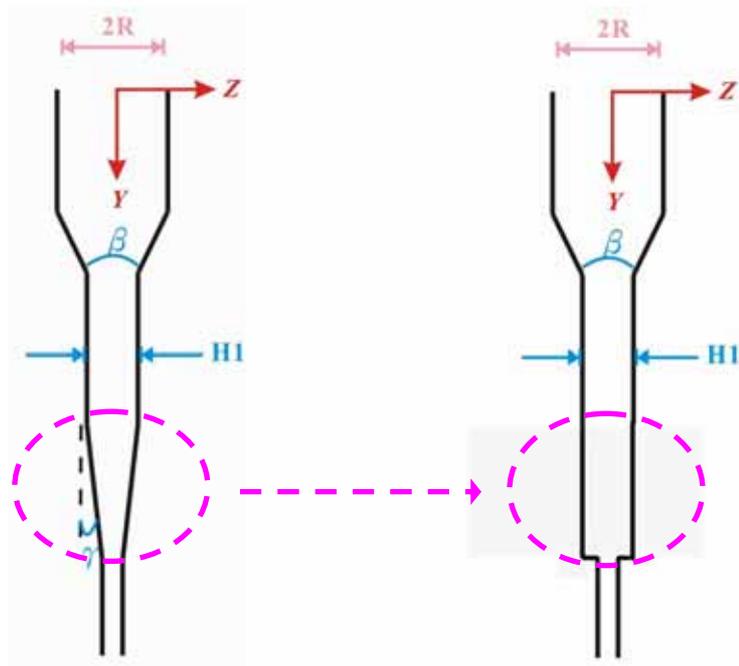


圖 29. 第二種模具：最佳設計點，模具內各區出口截面之流量均勻度

為了探討第二種模具其壓縮區之功效，將最佳設計點其幾何條件中之壓縮區改為限流區之延伸（控制除壓縮區外之幾何設計條件相同）以形成一不含壓縮區之模具，如圖 30 所示。並將此不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具做比較，如圖 31、表 24 與圖 32 所示。



With Compression Zone **Without Compression Zone**
(Second Coat-Hanger Die)

圖 30. 第二種模具：有無壓縮區之幾何比較示意圖

圖 31 為不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具之壓力分佈比較，可看出本研究設計之第二種模具不僅可增加總壓力降，在限流區後所直接設計之壓縮區也明顯減緩了壓力下降的趨勢，達到延遲預發泡時間的目的。

表 24 為不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具之預發泡發生位置比較，可觀察出第二種模具之壓縮區設計，其模具入口至預發泡位置占流道總長之百分率，較不含壓縮區之模具增加了 5.27%，延後了預發泡時間。

圖 32 為不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具之出口截面流量分佈比較，可看出本研究設計之第一種模具其出口流量均勻度為 0.969，優於

不含壓縮區之模具其出口流量均勻度 0.964。

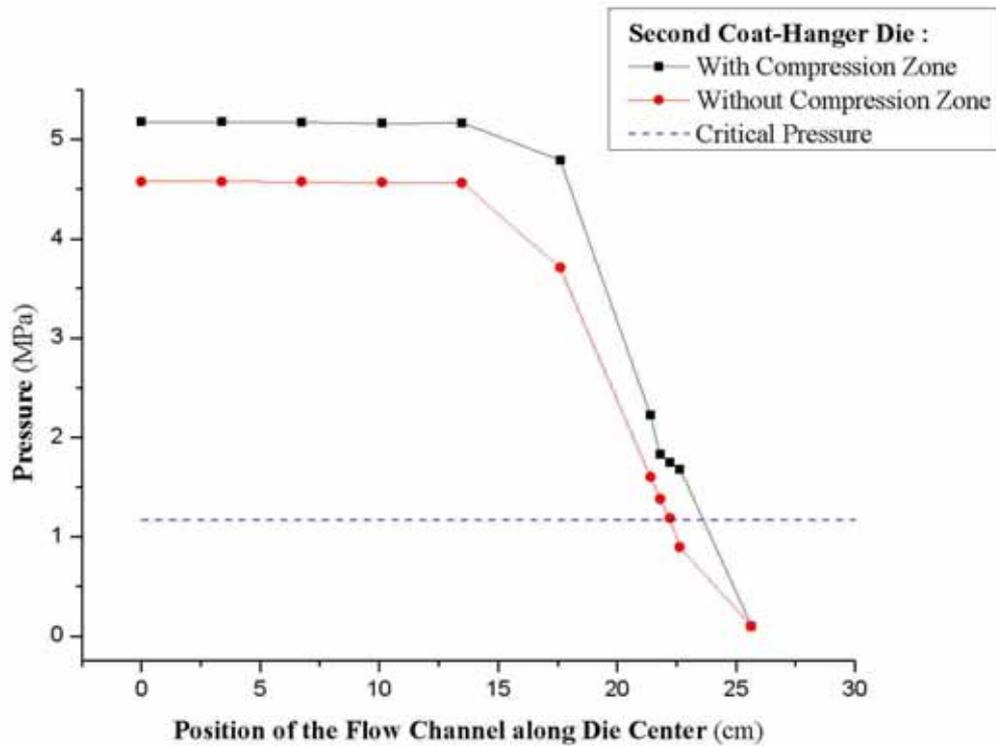


圖 31. 不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具之模具中心線壓力分佈比較

表 24. 不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道 總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
With Compression Zone	Die Lip	2.038	25.636	92.05 %
Without Compression Zone	Relaxation Zone	3.390	25.636	86.78 %

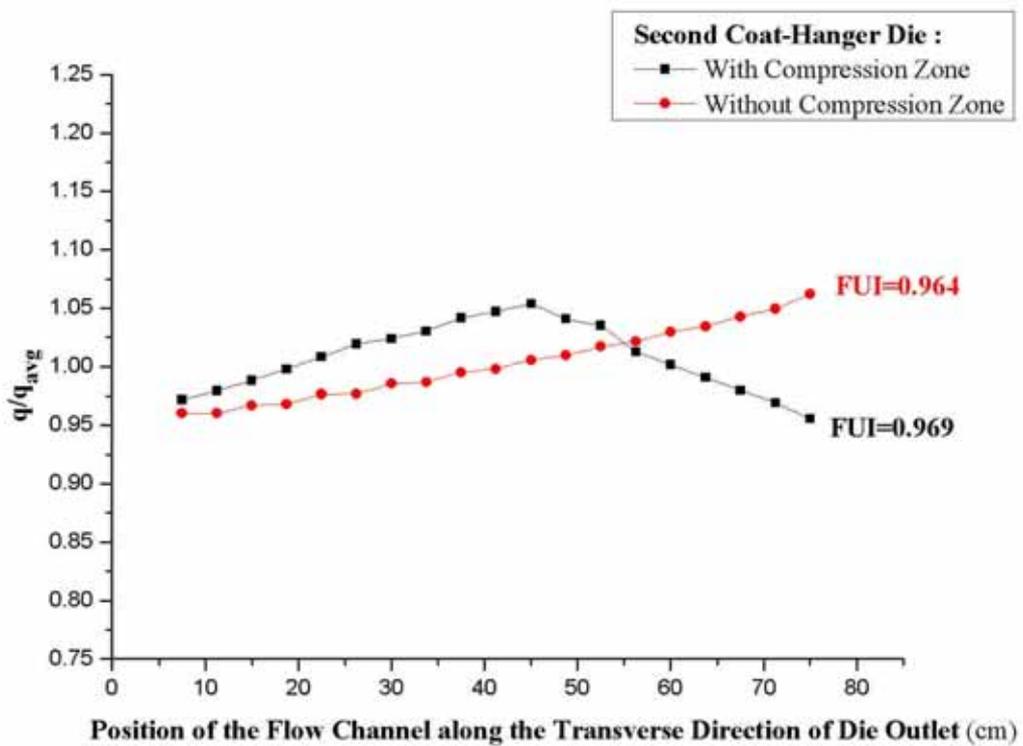


圖 32. 不含壓縮區之模具與第二種物理發泡型模具出口截面之流量分佈比較



3.3.3 第二種模具：改變模具幾何形狀之分析比較

模具幾何形狀對壓力變化與發泡位置影響甚鉅，本節針對第二種模具之最佳設計點，探討改變模具幾何形狀對分析結果之影響。

(A) 改變壓縮區之導角角度

由圖 33 可知壓縮區之導角角度 γ 對總壓力降具有顯著的影響，當壓縮區之導角角度 γ 增加，總壓力降則隨之增大。這是因為導角角度 γ 增加時，會造成壓縮區的空間愈為狹窄，更限制了流體流動而使流動阻力增大，造成壓力增加；另外，由於壓力增加，由表 25 中亦可觀察出增加導角角度 γ 可使預發泡時間延後，使預發泡位置接近模具出口。

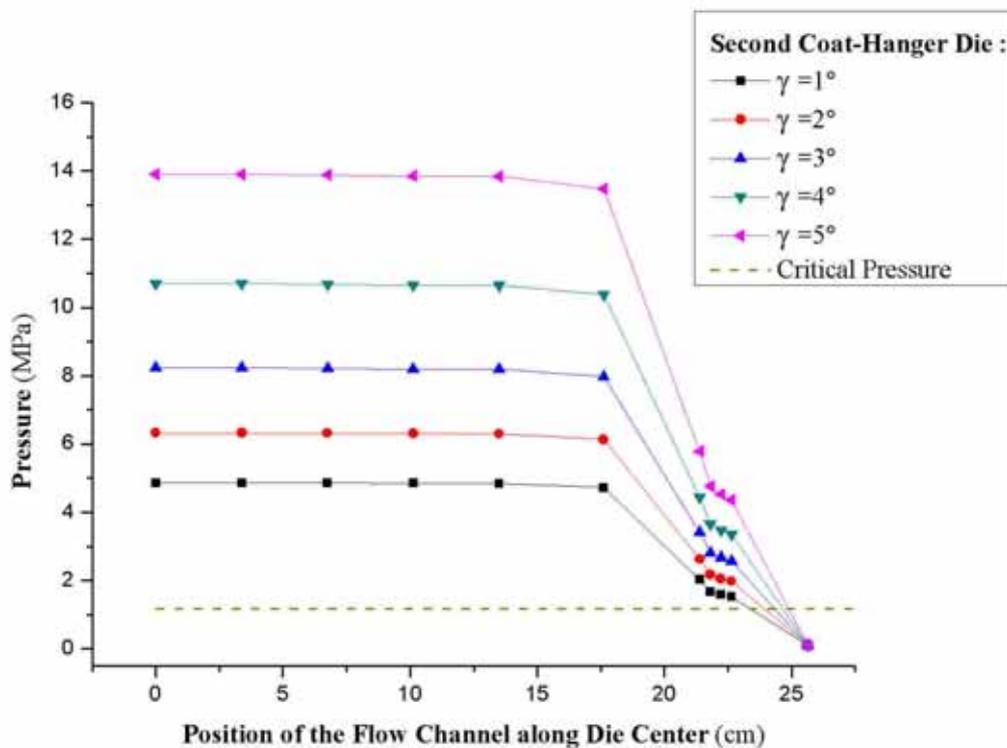


圖 33. 第二種模具：改變壓縮區之導角角度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 25. 第二種模具：改變壓縮區之導角角度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
$\gamma = 1^\circ$	Die Lip	2.256	25.636	91.20 %
$\gamma = 2^\circ$	Die Lip	1.707	25.636	93.34 %
$\gamma = 3^\circ$	Die Lip	1.298	25.636	94.94 %
$\gamma = 4^\circ$	Die Lip	0.989	25.636	96.14 %
$\gamma = 5^\circ$	Die Lip	0.755	25.636	97.05 %

(B) 改變壓縮區之長度

由圖 34 可知壓縮區之長度 A2 對總壓力降具有顯著的影響，當壓縮區之長度 A2 增加，總壓力降則隨之增大。這是因為壓縮區之長度 A2 增加時，會間接導致壓縮區出口深度變小，亦即會使得模唇區深度變小，流道變窄再加上流道增長，因而造成了壓力的增加；另外，由於壓力增加，由表 26 中亦可觀察出增加壓縮區長度可使預發泡時間延後，使預發泡位置接近模具出口。

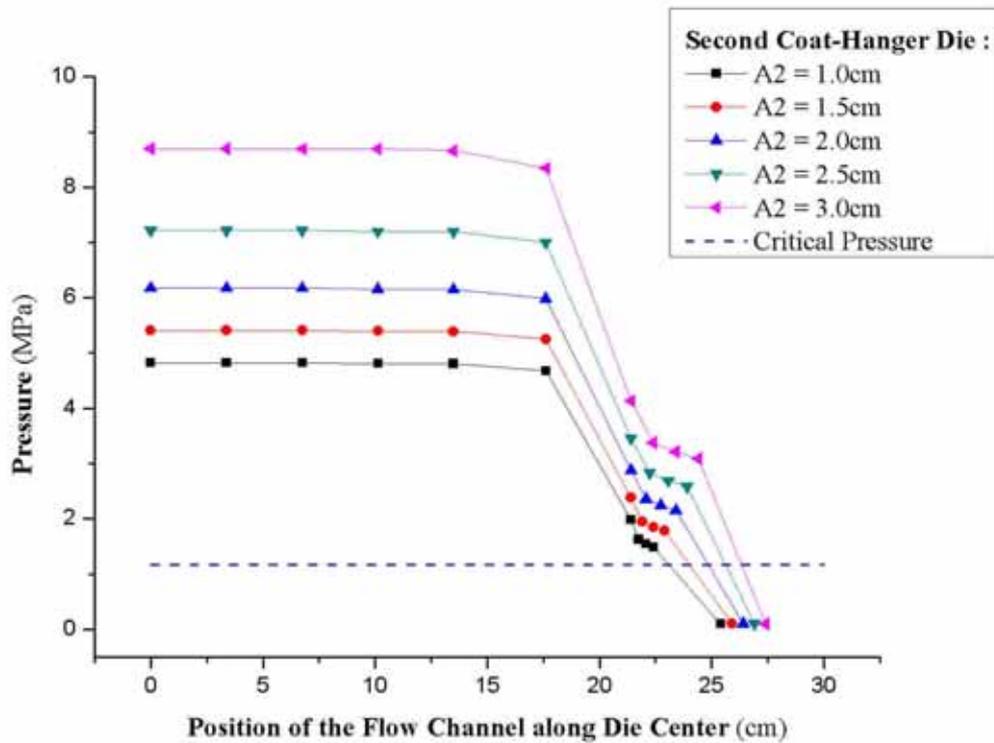


圖 34. 第二種模具：改變壓縮區之長度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 26. 第二種模具：改變壓縮區之長度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
A2 = 1.0 cm	Die Lip	2.321	25.398	90.86 %
A2 = 1.5 cm	Die Lip	1.911	25.898	92.62 %
A2 = 2.0 cm	Die Lip	1.565	26.398	94.07 %
A2 = 2.5 cm	Die Lip	1.294	26.898	95.19 %
A2 = 3.0 cm	Die Lip	1.075	27.398	96.07 %

(C) 改變壓縮區之起始深度

由圖 35 可知壓縮區之起始深度 $H1$ （在第二種模具中，等同於狹縫區之深度）對總壓力降具有顯著的影響，當壓縮區之起始深度 $H1$ 增加，總壓力降則會隨之遞減。這是因為壓縮區之起始深度 $H1$ 增加時，會造成壓縮區的空間增大，使得融膠往出口方向流動之流動阻力變小，造成壓力減低；另外，由於壓力減低，由表 27 中亦可觀察出增加壓縮區起始深度會導致預發泡時間提前，也導致發泡位置遠離了模具出口。

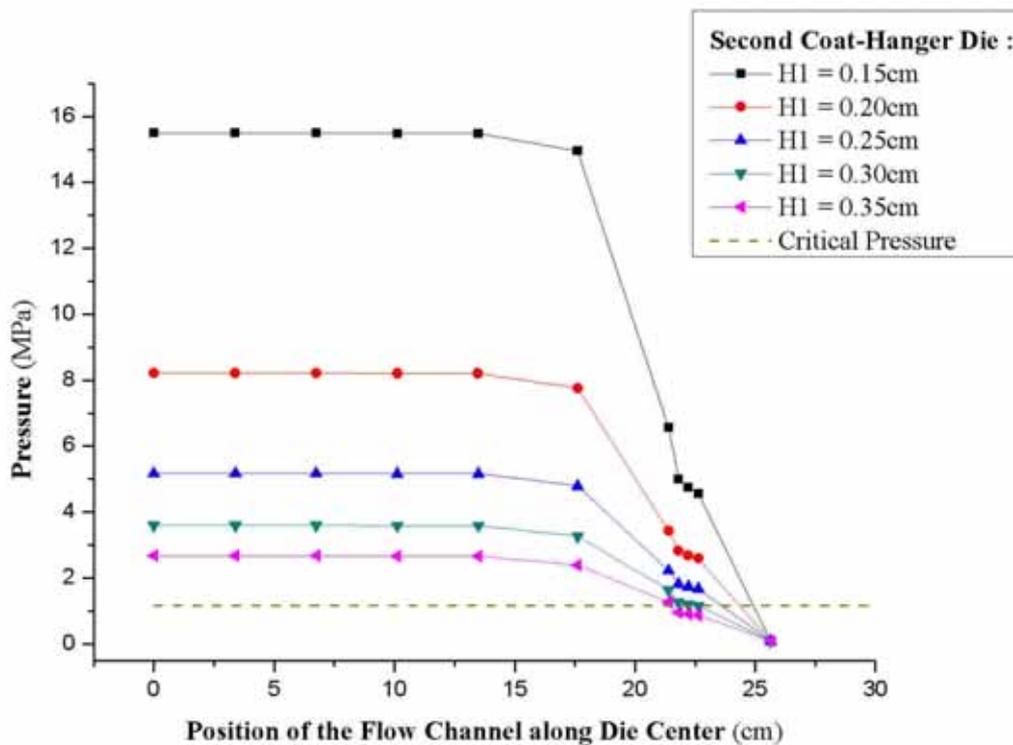


圖 35. 第二種模具：改變壓縮區之起始深度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 27. 第二種模具：改變壓縮區之起始深度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
H1 = 0.15 cm	Die Lip	0.718	25.636	97.20 %
H1 = 0.20 cm	Die Lip	1.290	25.636	94.97 %
H1 = 0.25 cm	Die Lip	2.038	25.636	92.05 %
H1 = 0.30 cm	Compression Zone	3.112	25.636	87.86 %
H1 = 0.35 cm	Compression Zone	4.100	25.636	84.01 %



3.3.4 第二種模具：改變氣體發泡劑溶解度之分析比較

氣體發泡劑溶解度對壓力變化與發泡位置影響甚鉅，本節針對第二種模具之最佳設計點，探討改變模具幾何形狀對分析結果之影響。

由圖 36 可知氣體發泡劑溶解度 w_g 對總壓力降具有顯著的影響，當氣體發泡劑溶解度 w_g 增加，總壓力降則會隨之遞減，至於發泡臨界壓力值卻隨之遞增。這是因為氣體發泡劑溶解度 w_g 的增加會降低黏度值，造成流動阻力變小，因而造成較低的壓力降值；然而氣體發泡劑溶解度 w_g 的增加也會提高發泡臨界壓力值，熔膠中氣體發泡劑含量愈多，預發泡愈容易提前發生，也導致發泡位置遠離了模具出口，如表 28 所示。

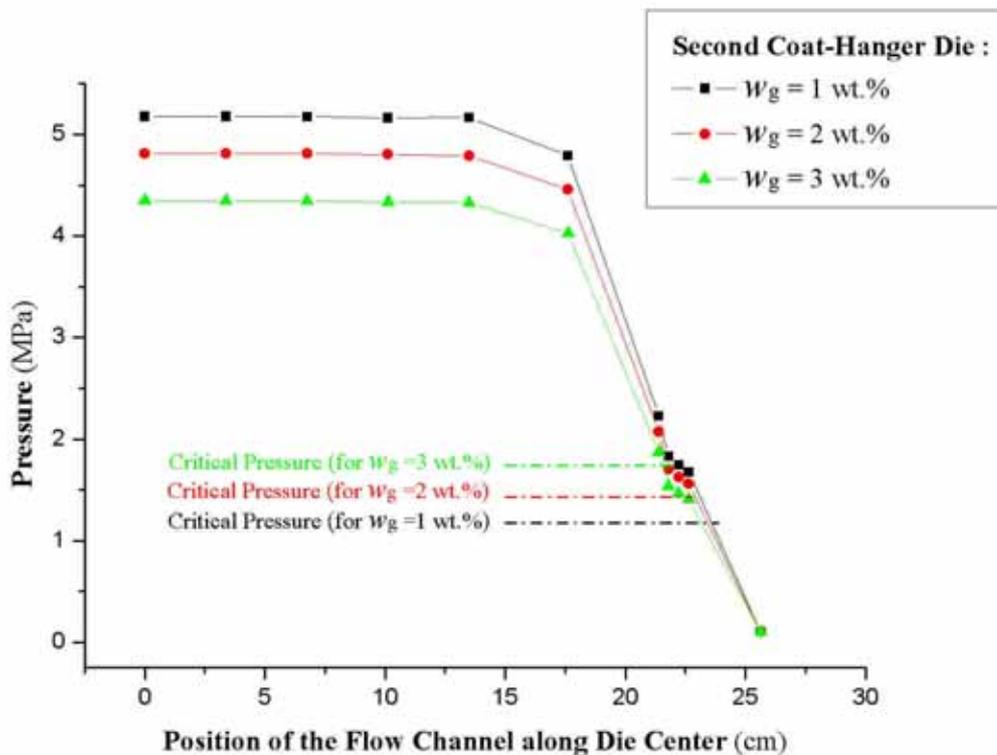


圖 36. 第二種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，沿模具中心線之壓力分佈比較

表 28. 第二種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
$w_g = 1 \text{ wt.}\%$	Die Lip	2.038	25.636	92.05 %
$w_g = 2 \text{ wt.}\%$	Die Lip	2.741	25.636	89.31 %
$w_g = 3 \text{ wt.}\%$	Compression Zone	4.078	25.636	84.09 %

圖 37 為各種氣體發泡劑溶解度 w_g 下之第二種模具出口截面流量分佈比較，可看出隨著氣體發泡劑含量的增加，出口均勻度會隨之遞減。

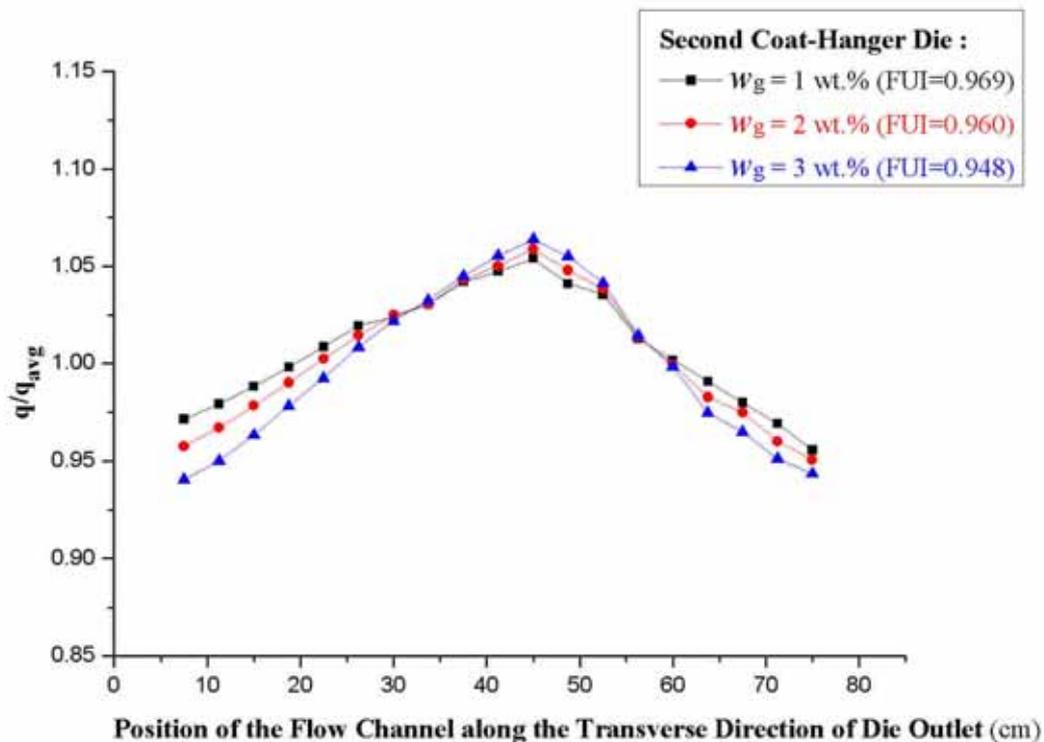


圖 37. 第二種模具：改變膠料中發泡劑溶解度，出口截面之流量分佈比較

3.3.5 考慮溫度效應下之非等溫流動分析

前述 3.3.1 至 3.3.4 節將模具內溫假設為 190 °C 等溫，探討第二種物理發泡衣架型模具內之等溫流動分析，本節則探討考慮溫度效應下之非等溫流動分析。將模具入口截面料溫以及模具壁溫設定為 190 °C，其餘模擬條件同於前述第二種模具之等溫模式最佳設計點，並將非等溫流動與等溫流動作一系列比較。

由圖 38 可觀察到在考慮溫度效應後，壓力分佈僅略低於前述之等溫流動分析結果，因此對於等溫流動狀態之假設下所做出的第二種模具最佳化設計亦可適用於真實的非等溫情況。總壓力降會下降的原因，主要是因為在不考慮溫度效應狀況下時，做了固定溫度的黏度值假設；但是實際考慮非等溫流動的情況下，溫度的上升會降低黏度，造成流動阻力變小，因而造成較低的壓力降。

圖 39 可觀察出流體於第二種模具中心線之內部溫度變化情形。當流體流經限流區及壓縮區時會有較明顯之升溫現象，這是因為當熔膠流到厚度較狹小的區域時，因剪切率增加而導致黏滯熱亦隨之增加，而造成的結果。由此模具中心線溫度分佈圖亦可觀察出，入口端的 190 °C 料溫，至出口時已升溫至 205.5 °C。

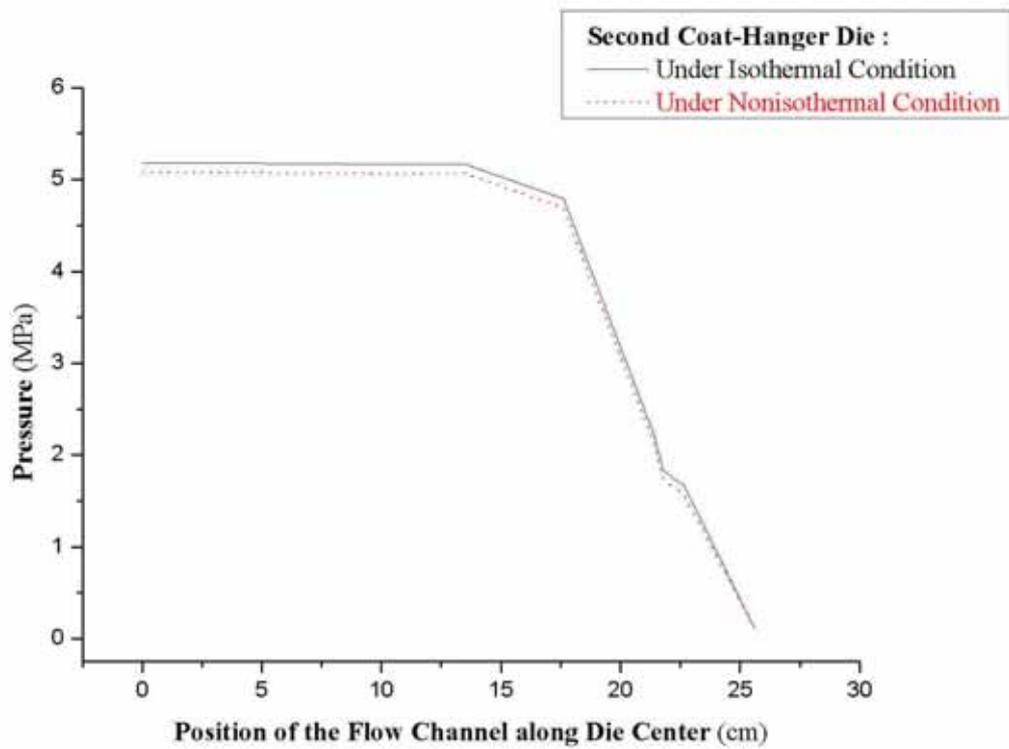


圖 38. 第二種模具：考慮等溫與非等溫情況下，沿模具中心線之壓力分佈比較

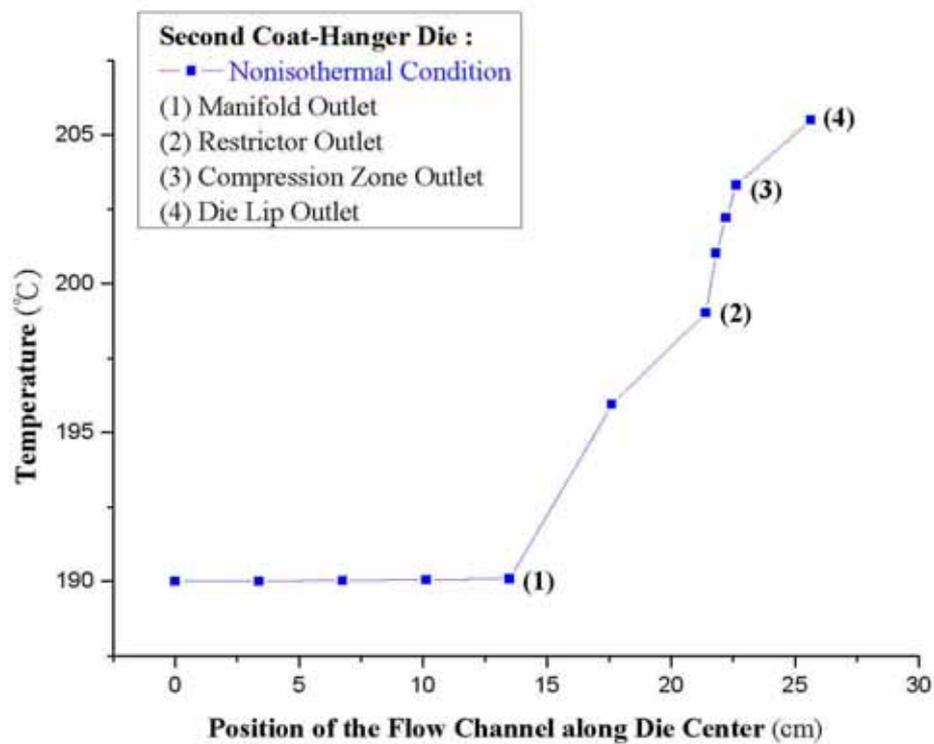


圖 39. 第二種模具：考慮非等溫情況下，沿模具中心線之溫度分佈

圖 40 可觀察到模具內部在各區出口截面之溫度分佈，比較起分歧管區出口時較不均一的溫度分佈，可清楚發現愈往模具出口方向，可得到愈來愈高的溫度均勻度。其中，流體於模具出口處之溫度分佈，出口溫度均勻度值可達到 0.9983。

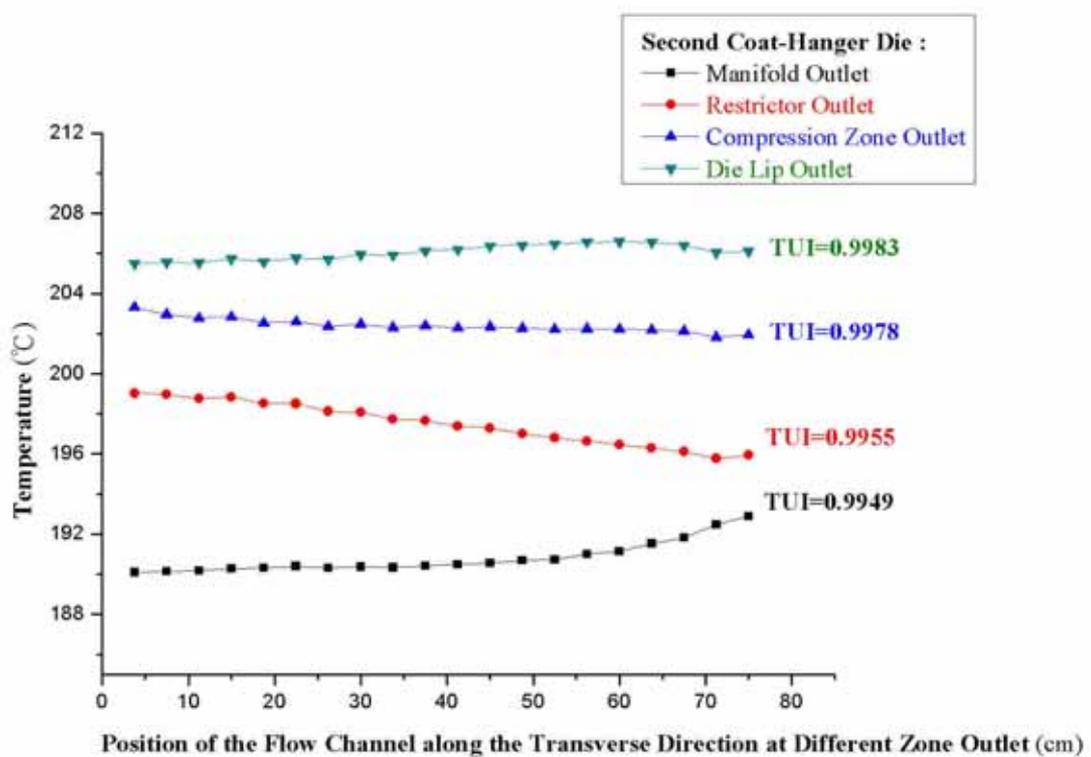


圖 40. 第二種模具：考慮非等溫情況下，模具內各區出口截面沿寬度方向之溫度分佈比較

3.4 第一種與第二種物理發泡衣架型模具之綜合比較

本研究所設計之兩種模具，設計上最大的差異在於第一種模具較第二種模具多了鬆弛區。本節為了比較兩種模具性能之優劣，將第一種模具其限流區長度 $A1$ 與鬆弛區長度 $A2$ 之和，設計成等同於第二種模具其限流區長度 $A1$ ，經此設計則可使兩種模具之流道總長度相同，以便進行兩模具一系列之比較。第一種模具與第二種模具進行綜合比較之幾何示意圖，如圖 41 所示。評估比較的性能則包括：模具內壓力分佈、膠料發泡位置、出口流量均勻度以及出口溫度均勻度。

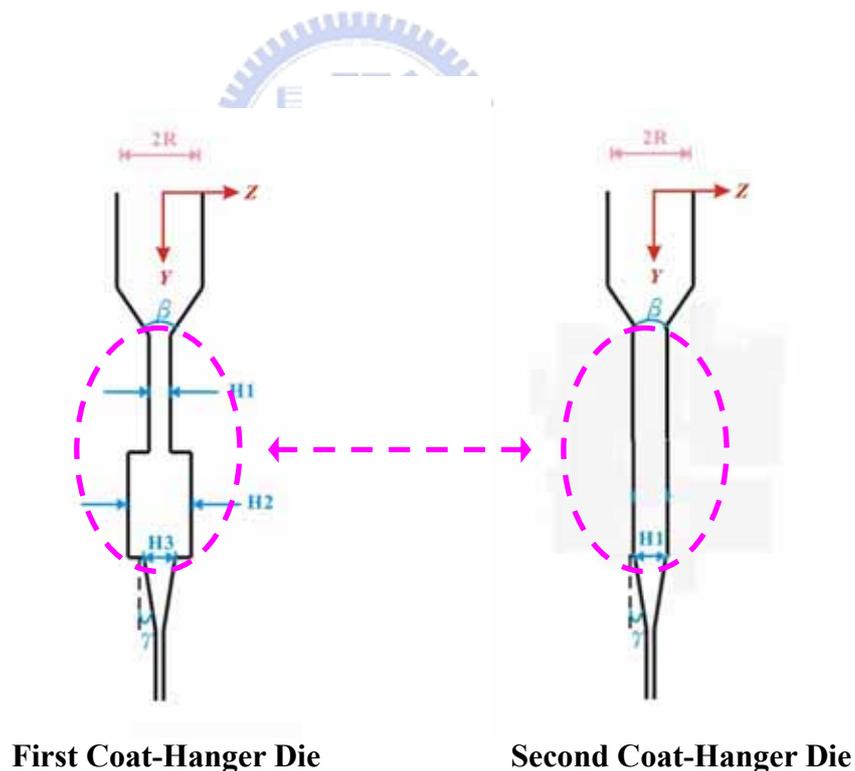


圖 41. 第一種模具與第二種模具進行綜合比較之幾何示意圖

3.4.1 以第一種模具之最佳設計點為基準，進行兩模具之分析比較

以 3.2.1 節求得之第一種模具最佳設計點 (Design Point 10) 為基準，並以上述控制流道總長度之方法將其設計參數套用在第二種模具上，如表 29 所示。

表 29. 以第一種模具之最佳設計點為基準，兩種模具之幾何參數對照

	RMI (cm)	RME (cm)	θ (°)	H1 (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	A3 (cm)	β (°)	γ (°)	A4 (cm)
First Coat-Hanger Die	14.000	2.406	5.616	0.333	2.700	2.916	0.405	0.164	1.100	65.373	1.101	3.000
	RMI (cm)	RME (cm)	θ (°)	A1 (cm)		H1 (cm)		A2 (cm)	β (°)	γ (°)	A3 (cm)	
Second Coat-Hanger Die	14.000	2.406	5.616	5.616		0.164		1.100	65.373	1.101	3.000	

計算並比較兩種模具沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，結果如圖 42 所示。由圖 42 可觀察出，第一種模具由於多了鬆弛區的設計，鬆弛區釋放壓力的作用造成了總壓力降明顯低於第二種模具；相對地，第二種模具則因不含鬆弛區而減緩了壓力下降趨勢。

表 30 為兩種模具之預發泡發生位置比較，可觀察出第二種模具由模具入口至預發泡位置占流道總長之百分率，較第一種模具增加了 1.02 %，延後了預發泡時間，使膠料發泡位置能更接近模具出口，故就壓力分佈與膠料發泡位置的觀點，第二種模具是優於第一種模具的。

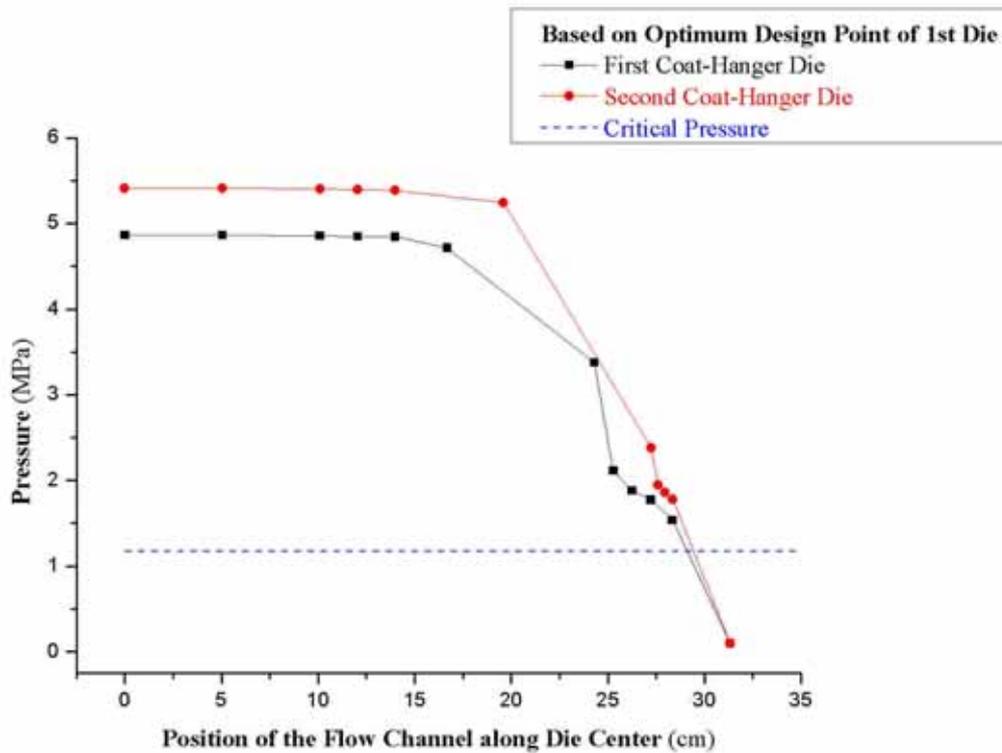


圖 42. 以第一種模具之最佳設計點為基準，兩種模具沿模具中心線之壓力分佈比較

表 30. 以第一種模具之最佳設計點為基準，兩種模具沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道 總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
First Coat-Hanger Die	Die Lip	2.230	31.333	92.88 %
Second Coat-Hanger Die	Die Lip	1.911	31.333	93.90 %

比較兩模具之出口截面流量分佈與出口截面溫度分佈，結果分別如圖

43 與圖 44 所示。

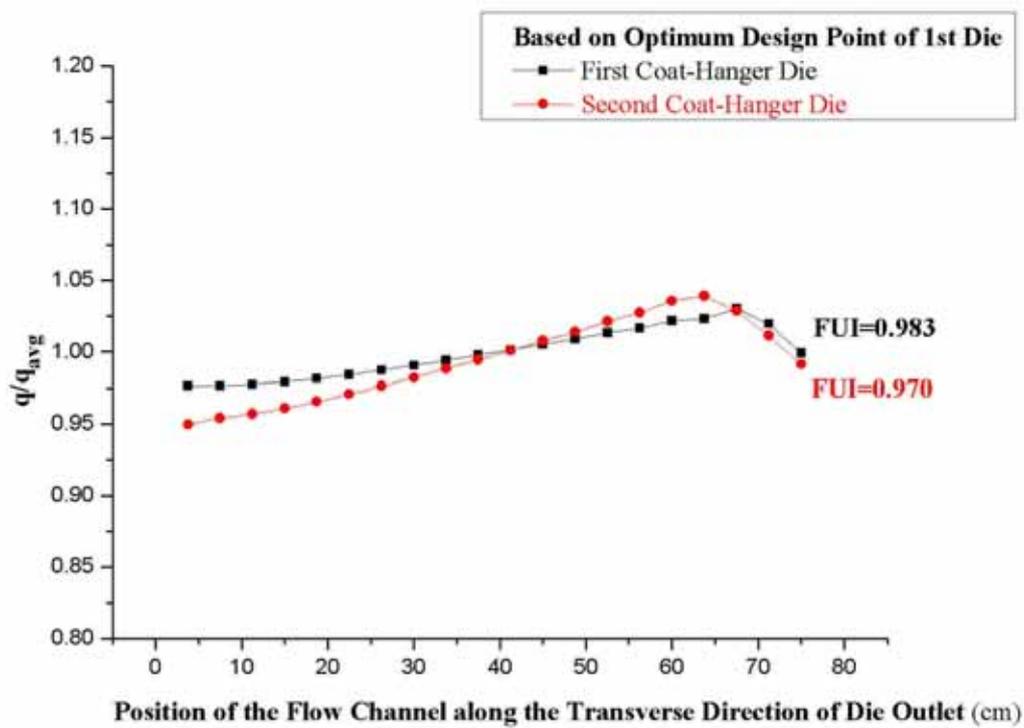


圖 43. 以第一種模具之最佳設計點為基準，兩種模具出口截面之流量分佈比較

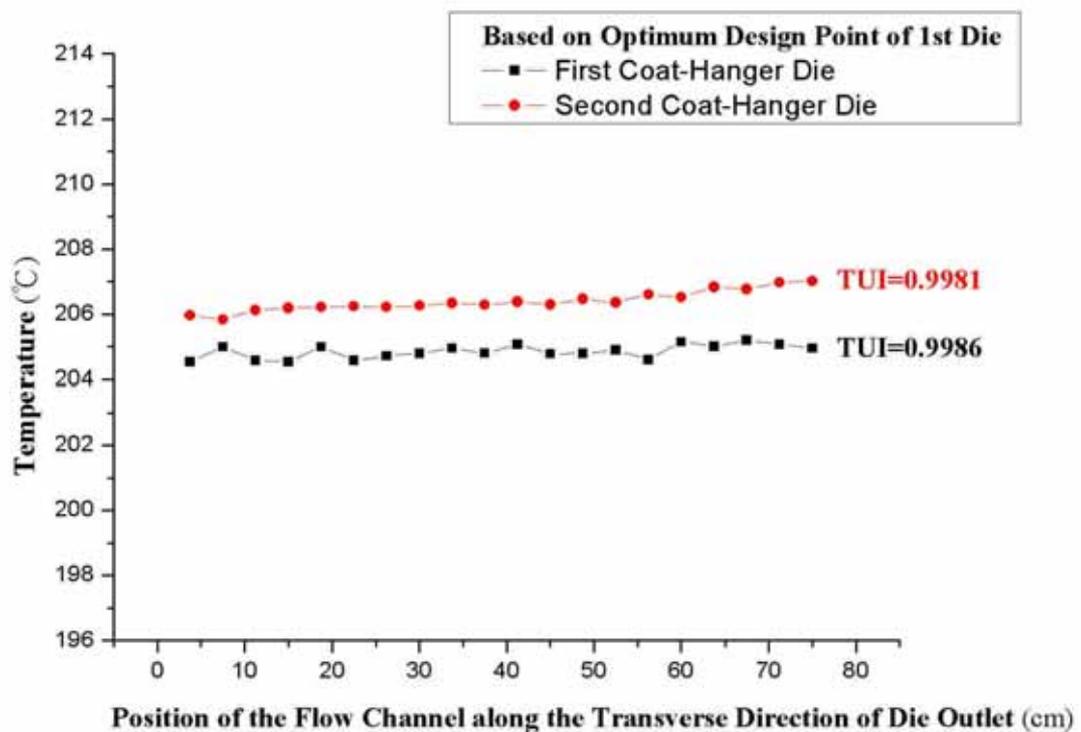


圖 44. 以第一種模具之最佳設計點為基準，兩種模具出口截面之溫度分佈比較

可看出第一種模具其出口流量均勻度為 0.983，優於第二種模具之出口流量均勻度 0.970；至於第一種模具之出口溫度均勻度為 0.9986，亦略優於第二種模具之出口溫度均勻度 0.9981，且第一種模具之出口料溫低於第二種模具之出口料溫。此結果則顯示於限流區與壓縮區之間設計一段適當的鬆弛區確實能有效提高流量均勻度與溫度均勻度，就出口流量均勻度及出口溫度均勻度的觀點，第一種模具是優於第二種模具的。

3.4.2 以第二種模具之最佳設計點為基準，進行兩模具之分析比較

以 3.3.1 節求得之第二種模具最佳設計點 (Design Point 12) 為基準，並以上述控制流道總長度之方法將其設計參數套用在第一種模具上 (如表 31 所示)。

表 31. 以第二種模具之最佳設計點為基準，兩種模具之幾何參數對照

	RMI (cm)	RME (cm)	θ ($^{\circ}$)	H1 (cm)	A1 (cm)	A2 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	A3 (cm)	β ($^{\circ}$)	γ ($^{\circ}$)	A4 (cm)
First Coat-Hanger Die	13.492	2.911	2.797	0.333	2.061	2.061	0.405	0.252	1.238	40.744	1.342	3.000
	RMI (cm)	RME (cm)	θ ($^{\circ}$)	A1 (cm)		H1 (cm)		A2 (cm)	β ($^{\circ}$)	γ ($^{\circ}$)	A3 (cm)	
Second Coat-Hanger Die	13.492	2.911	2.797	4.122		0.252		1.238	40.744	1.342	3.000	

計算並比較兩種模具沿模具中心線由入口往出口方向之壓力變化，結果如圖 45 所示。至於表 32 則為兩種模具之預發泡發生位置比較，可觀察出第二種模具由模具入口至預發泡位置占流道總長之百分率，較第一種模具增加了 1.98 %。同於 3.4.1 節之原因，由圖 42 及表 32 可再次驗證，就壓力分佈與膠料發泡位置的觀點，不含鬆弛區的第二種模具是優於第一種模具的。

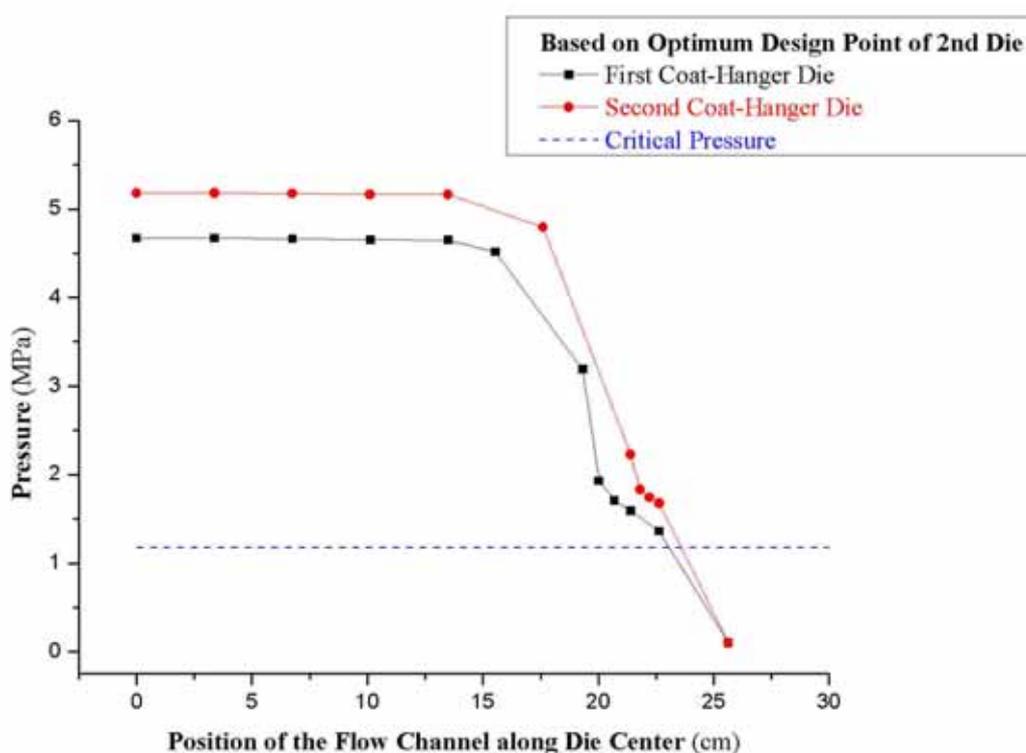


圖 45. 以第二種模具之最佳設計點為基準，兩種模具沿模具中心線之壓力分佈比較

表 32. 以第二種模具之最佳設計點為基準，兩種模具沿模具中心線之預發泡發生位置及由入口至預發泡位置占流道總長之百分率比較

Dies	預發泡發生區域	預發泡位置離 模具出口距離 (cm)	流道 總長 (cm)	由入口至預發泡位置 占流道總長之百分率 (%)
First Coat-Hanger Die	Die Lip	2.546	25.636	90.07 %
Second Coat-Hanger Die	Die Lip	2.038	25.636	92.05 %

比較兩模具之出口截面流量分佈與出口截面溫度分佈，結果分別如圖

46 與圖 47 所示。

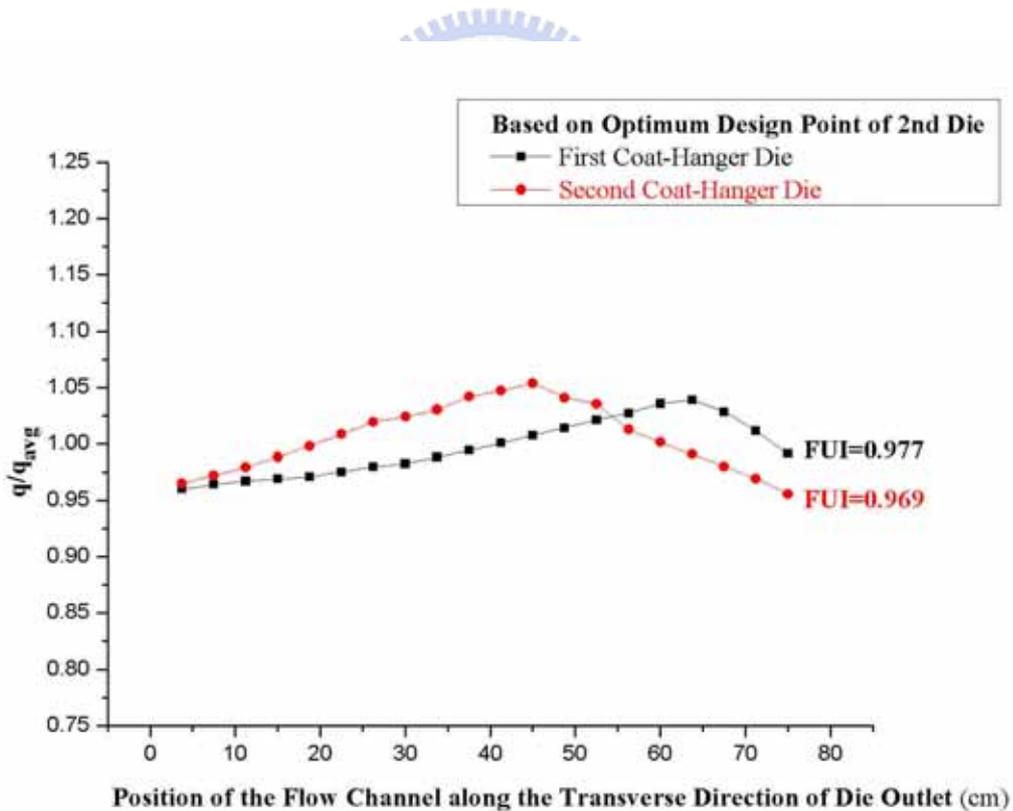


圖 46. 以第二種模具之最佳設計點為基準，兩種模具出口截面之流量分佈比較

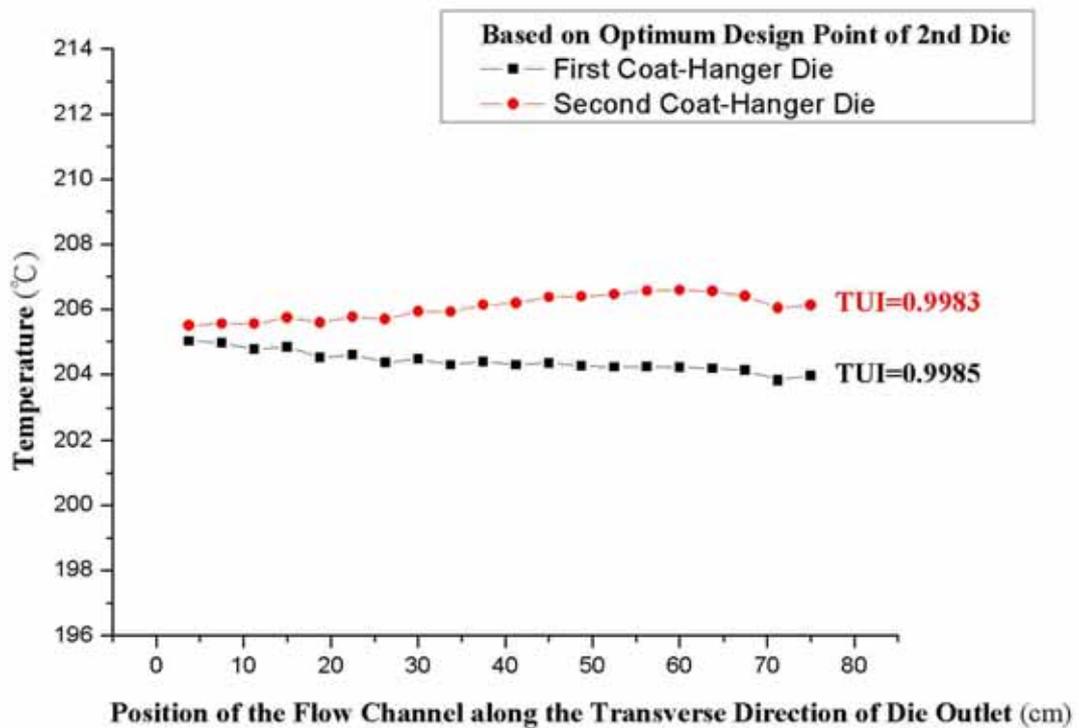


圖 47. 以第二種模具之最佳設計點為基準，兩種模具出口截面之溫度分佈比較

可看出第一種模具其出口流量均勻度為 0.977，優於第二種模具之出口流量均勻度 0.969；至於第一種模具之出口溫度均勻度為 0.9985，亦略優於第二種模具之出口溫度均勻度 0.9983，且第一種模具之出口料溫低於第二種模具之出口料溫。此結果則再次驗證於限流區與壓縮區之間設計一段適當的鬆弛區確實能有效提高流量均勻度與溫度均勻度，就出口流量均勻度及出口溫度均勻度的觀點，第一種模具是優於第二種模具的。