



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Optimización del tiempo de calentamiento en un molde de respuesta rápida térmica mediante FEM-MSR-PSO

Heating time optimization in a rapid thermal response mold using FEM-MSR-PSO

Cervantes-Vallejo, F.J.^a, Camarillo-Gómez K.A.^b, Pérez-Soto G.I.^c, Louvier-Hernandez J.F.^d, Orozco-Mendoza H.^b

^a Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Gto. 38010, México.

^b Departamento de Ingeniería Mecánica, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Gto. 38010, México.

^c Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Qro. 76010, México.

^d Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Gto. 38010, México.

Autor de contacto: karla.camarillo@itcelaya.edu.mx

Innovación tecnológica: Procesamiento de polímeros.

Área de aplicación industrial: Moldes de inyección de plásticos.

Enviado: 05 Junio 2019

Aceptado: 10 Agosto 2019

Abstract

This paper presents a heating system in a rapid thermal response mold is optimized implementing a surface response methodology. The numerical factors in the Box-Behnken design are: (1) the heat flux per area unit of the electrical heating rods, (2) the distance between centers of the electrical heating rods to the surface of the cavity, and (3) the distance between the adjacent electrical heating rods. Thermal and thermal- structural analysis were performed to get the required heating time, the variation of the temperature in the cavity, and the Von-Mises Stress. An analysis of variance verified the results obtained. Finally, by coupling the mathematical models with the particle swarm optimization method, the optimal values of the position of the electrical heating rods were found to minimize the heating time within a specific temperature distribution and structural strength.

Keywords: Thermal Analysis, Rapid Thermal Response Mold (RTRM), Injection Molding, Particle Swarm Optimization (PSO).

Resumen

En este trabajo se optimiza un sistema de calentamiento por resistencias eléctricas en un molde de respuesta térmica rápida implementando una metodología de superficie de respuesta. Los factores numéricos en el diseño de experimentos Box-Behnken son el flujo de calor por unidad de área de las resistencias eléctricas, la distancia del centro de las resistencias a la superficie de la cavidad y la distancia entre las resistencias adyacentes. Se realizaron análisis térmicos y de resistencia térmico-estructural para obtener el tiempo de calentamiento requerido, la variación de la temperatura en la cavidad y los esfuerzos de Von-Mises. Los resultados obtenidos se comprobaron mediante un análisis de varianza. Finalmente, del acople de los modelos matemáticos con el método de optimización de enjambre de partículas, se encontraron los valores óptimos de la posición de las resistencias para minimizar el tiempo de calentamiento dentro de una distribución de temperatura y resistencia estructural específicas.

Palabras Clave: Análisis térmico, Molde de Respuesta Térmica Rápida (MRTR), Moldeo por Inyección, Optimización de Enjambre de Partículas (PSO).

1. Introducción

En la industria del plástico, la temperatura del molde es uno de los factores más importantes y de gran importancia en el tiempo de ciclo del proceso, además, de ser un parámetro relevante en la calidad superficial de la pieza inyectada. Cuando la temperatura del molde es baja, el tiempo de ciclo se reduce, pero surgen problemas en el proceso y de calidad en la pieza, la presión y velocidad de inyección debe incrementarse, consecuencia de la prematura solidificación del polímero y como resultado la parte inyectada, presentará una calidad superficial deficiente, baja rugosidad, líneas de soldadura, disparos cortos, etc. [1,2]. Para mejorar la calidad de la pieza de plástico es necesario implementar procesos secundarios como pulido, lijado, etc., lo que provoca un incremento de procesos y el costo de la pieza final [3]. Para resolver estos problemas y satisfacer las nuevas exigencias de la industria del plástico, recientemente ha surgido una nueva tecnología de moldeo por inyección llamada molde de respuesta térmica rápida (MRTR) que mejora superficialmente y reduce los procesos en las piezas fabricadas.

Este es un proceso alternante entre un calentamiento y enfriamiento rápido en cada ciclo de moldeo. El funcionamiento principal está basado en el aumento de la temperatura en la superficie de la cavidad del molde, generalmente hasta la temperatura de cristalización (T_c) en polímeros semicristalinos [4], como consecuencia el polímero que llena la cavidad fluye fácilmente, lo que permite reducir la presión y velocidad de inyección, además de mejorar las características del proceso aumentará la calidad superficial de la pieza inyectada. Los métodos propuestos de calentamiento rápido del molde incluyen principalmente calentamiento por resistencia [5-7], calentamiento por inducción [8], calentamiento por proximidad de alta frecuencia [9], calentamiento por infrarrojos [10], calentamiento asistido con gas [11] y calentamiento por convección usando fluidos calientes tales como aceite [12], agua y vapor [13]. Además de estos métodos, existe otro método de calentamiento externo especial en el que una delgada capa de material con baja conductividad térmica se recubre o se adhiere a la superficie del molde para un el calentamiento del molde [14]. La superficie

de la cavidad se calienta durante la etapa de llenado mediante la fusión del polímero caliente inyectado y la delgada capa material que recubre a la cavidad. Para obtener el mejor rendimiento del sistema de calentamiento en términos de la distribución de la temperatura en la superficie de la cavidad del molde y la eficiencia de calentamiento, es necesario optimizar la posición de los dispositivos de calentamiento en el molde. Para solucionar este problema, se han propuesto algunos métodos de diseño de optimización. Li *et al.* [15] propusieron la estrategia de optimización combinando la metodología de la superficie de respuesta (MSR) con el algoritmo genético (AG) para optimizar el diseño de los canales de calentamiento para un molde de inyección con calentamiento asistido por vapor. Huang *et al.* [16] diseñaron una red neuronal artificial (RNA) para construir las variables del proceso, muy semejante a lo que se obtiene en el MSR, la red neuronal la acoplaron a un AG [17] para la optimizar los diámetros y posición de los canales de enfriamiento en un molde de inyección. Sin embargo, se ha demostrado que un método de búsqueda estocástico para la optimización, llamado optimización de enjambre de partículas (PSO) resulta ser más rápido y mejor que las redes neuronales y los algoritmos genéticos [18].

En este artículo, se presenta la optimización de un sistema de calentamiento por resistencias eléctricas en un MRTR usando una MSR. Se consideraron como factores numéricos en el diseño de experimentos Box-Behnken, el flujo de calor por unidad de área de las resistencias eléctricas, la

distancia entre centros de las resistencias a la superficie de la cavidad y la distancia entre las resistencias adyacentes. Además, se presentan los análisis térmicos y de resistencia térmico-estructural para obtener el tiempo de calentamiento requerido, la variación de la temperatura en la cavidad y los esfuerzos de Von-Mises. Los resultados obtenidos se comprobaron mediante un análisis de varianza (ANOVA). Finalmente, se acoplaron los modelos matemáticos con el método PSO, lo que permitió encontrar los valores óptimos de la posición de las resistencias para minimizar el tiempo de calentamiento dentro de una distribución de temperatura y resistencias estructurales específicas.

2. Modelo físico y matemático del MRTR

La principal diferencia entre el moldeo por inyección convencional (MIC) y el moldeo con un MRTR es la estrategia de control de la temperatura del molde. En el MRTR, el molde debe calentarse y enfriarse rápidamente para lograr un moldeo por inyección a alta temperatura sin aumentar demasiado el tiempo de ciclo de moldeo.

La Figura 1 muestra el MRTR y la probeta de tensión. La norma ASTM D 638-03 [19] especifica las dimensiones de la probeta de tensión tipo 1 mostrada en la Figura 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(b), como se menciona en la norma, para lograr un balance de fuerzas se proponen dos piezas finales en la cavidad del molde, la Figura 1(a) muestra un dibujo esquemático con los componentes principales del MRTR.

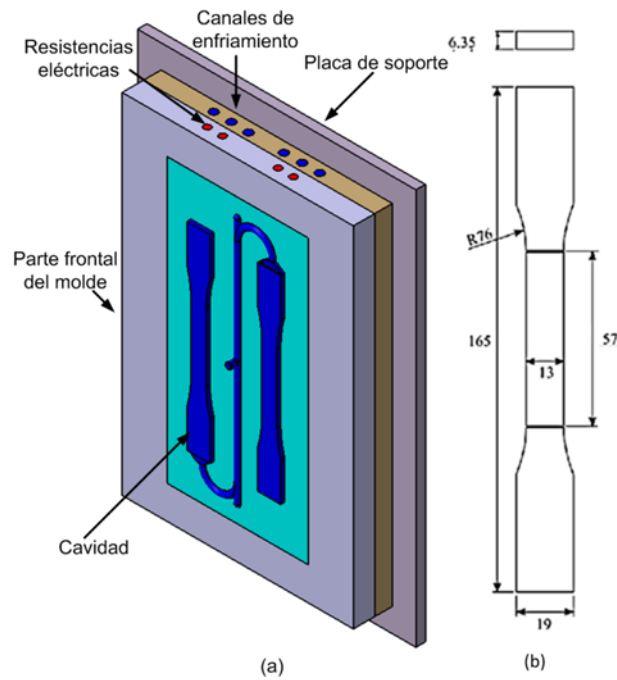


Figura 1. Esquema del MRTR para una probeta de tensión. (a) Esquema Isométrico del MRTR. (b) Pieza probeta de tensión unidades en mm.

Un control dinámico de la temperatura del molde se implementa calentando y enfriando el molde en cada ciclo del proceso, por lo que la transferencia de calor es muy diferente de la del proceso MIC. En la etapa de calentamiento del molde, este debe ser calentado hasta la temperatura preestablecida utilizando resistencias eléctricas, Wang en [20], propone que, para mejor apariencia de la pieza de plástico, la temperatura en la superficie de la cavidad del molde debe ser igual la temperatura de cristalización del polímero en la etapa del llenado. El calor generado se transfiere principalmente al acero del molde a través de la conducción del calor, solamente una pequeña cantidad de calor se acumula en las resistencias eléctricas y en el marco del molde y otra se disipa al ambiente.

La Figura 2 ilustra esquemáticamente la transferencia de calor en la etapa de calentamiento y enfriamiento del MRTR con calentamiento eléctrico. En la etapa de calentamiento, mostrado en la Figura 2(a), basándose en la ley de conservación de energía, la ecuación de equilibrio de transferencia de calor del molde durante la etapa de calentamiento puede expresarse:

$$Q_e = Q_m + Q_c + Q_a^c + Q_i^c \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde Q_e es el calor generado por las resistencias eléctricas; Q_m es el calor transferido al acero del molde; Q_c indica el calor acumulado en las resistencias; Q_a^c y Q_i^c representan el calor disipado al ambiente y al marco del molde en la etapa de calentamiento del molde, respectivamente. Los Q_c , Q_a^c y Q_i^c son bastante pequeños en comparación con el Q_m y por lo tanto tienen efectos despreciables sobre el campo de temperatura del molde durante el calentamiento. Así, la ec. (1) se puede simplificar como:

$$Q_e \approx Q_m \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde Q_e y Q_m pueden ser representados respectivamente por:

$$Q_e = P_r t_{cr} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$Q_m = C_m \rho_m V_m (\overline{T}_m - \overline{T}_m^i) \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde P_r es la potencia total de las resistencias eléctricas; t_{cr} es el tiempo de calentamiento requerido; \overline{T}_m^i es la temperatura inicial del molde; \overline{T}_m es la temperatura media del molde en el tiempo t_{cr} ; C_m , ρ_m y V_m representan el calor específico, densidad y volumen del molde, respectivamente.

Sustituyendo las ecs. (3) y (4) en (2) se obtiene la siguiente expresión:

$$t_{cr} = [C_m \rho_m V_m (\overline{T}_m - \overline{T}_m^i)] / P_r \quad (\text{Ec. 5})$$

Cuando se moldea una pieza de plástico específica usando un MRTR, las \overline{T}_m y \overline{T}_m^i están generalmente predeterminadas y, por lo tanto, pueden considerarse constantes. En vista de esto, t_{cr} depende principalmente de los parámetros C_m , ρ_m , V_m y P_r . La eficiencia de calentamiento del molde se puede mejorar, es decir, el t_{cr} en la ec. (5) se puede minimizar, reduciendo los valores de C_m , ρ_m , V_m y/o aumentando el valor del P_r .

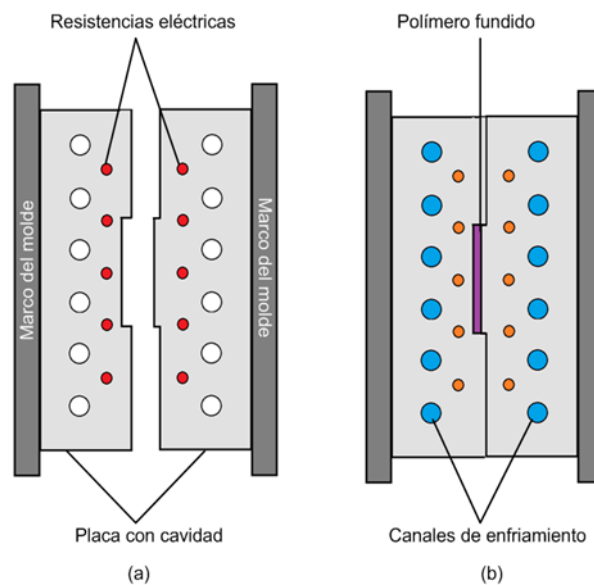


Figura 2. Esquemas de transferencia de calor del MRTR con calentamiento eléctrico. (a) Calentamiento; (b) Enfriamiento.

El producto de C_m y ρ_m para la mayoría de los materiales del molde tiene poca diferencia, por lo que la forma de seleccionar el material del molde con menor C_m y ρ_m para mejorar la eficiencia de calentamiento del molde no es la adecuada [21]. Por lo tanto, bajo condiciones apropiadas de resistencia y rigidez estructural del molde, el volumen del molde calentado debe reducirse tanto como sea posible para reducir la capacidad calorífica del molde. Además, aumentar el número y o la densidad de potencia de las resistencias eléctricas adecuadamente puede mejorar aún más la eficiencia de calentamiento del molde.

En la Figura 2(b) se muestra la etapa de enfriamiento del molde, en esta se bombea refrigerante a los canales de enfriamiento para reducir rápidamente la temperatura del molde y la pieza moldeada. El calor acumulado en el molde de acero y las resistencias eléctricas en la etapa de calentamiento, así como el calor liberado de la masa fundida de polímero, durante el enfriamiento son eliminados por el refrigerante en circulación (convección forzada); además, una pequeña cantidad de calor disipa al ambiente (convección natural) y al marco del molde (conducción) [22]. El calor perdido a través de las superficies exteriores del molde en

aplicaciones reales es mínimo; por lo tanto, estas superficies pueden tratarse como adiabática [23].

La ecuación de equilibrio de transferencia de calor del molde durante su enfriamiento puede expresarse como:

$$Q_p + Q_m + Q_c = Q_r + Q_a^e + Q_i^e \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde Q_p es el calor liberado del polímero fundido; Q_r representa el calor removido por el refrigerante; Q_a^e y Q_i^e representan el calor disipado al ambiente y al marco del molde en la etapa de enfriamiento del molde, respectivamente.

El Q_p y Q_r pueden ser representados por las siguientes expresiones [24]:

$$Q_p = C_p \rho_p V_p (\overline{T}_p^i - \overline{T}_p) \quad (\text{Ec. 7})$$

$$Q_r = h_c A_c \int_0^{t_{er}} [\overline{T}_{cs}(t) - T_r] dt \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde C_p , ρ_p y V_p representan el calor específico, la densidad y el volumen de la masa fundida de polímero, respectivamente; \overline{T}_p^i es la temperatura inicial del polímero fundido; \overline{T}_p es la temperatura de eyección de la pieza; h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en la interface entre el refrigerante y los canales de enfriamiento; A_c es la superficie interna de los canales de refrigeración; t_{er} representa el tiempo de enfriamiento requerido; \overline{T}_{cs} indica la temperatura media de la pared de los canales de refrigeración en el instante t ; y T_r es la temperatura del refrigerante. Al sustituir las ecs. (4), (7) y (8) en (6), se puede obtener la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} C_p \rho_p V_p (\overline{T}_p^i - \overline{T}_p) + C_m \rho_m V_m (\overline{T}_m - \overline{T}_m^i) \\ + Q_c \\ = h_c A_c \int_0^{t_{er}} [\overline{T}_{cs}(t) \\ - T_r] dt + Q_a^e + Q_i^e \end{aligned} \quad (\text{Ec. 9})$$

Los efectos de Q_c , Q_a^e y Q_i^e en el campo de temperatura del molde durante el enfriamiento pueden ser despreciables, de modo que la ec. (10) se puede expresar como:

$$\begin{aligned} C_p \rho_p V_p (\overline{T}_p^i - \overline{T}_p) \\ + C_m \rho_m V_m (\overline{T}_m - \overline{T}_m^i) \\ = h_c A_c \int_0^{t_{er}} [\overline{T}_{cs}(t) - T_r] dt \end{aligned} \quad (\text{Ec. 10})$$

Mediante el uso del teorema del valor medio de las integrales, la ec. (10) se puede representar como la siguiente expresión:

$$t_{er} = \frac{C_p \rho_p V_p (\overline{T}_p^i - \overline{T}_p) + C_m \rho_m V_m (\overline{T}_m - \overline{T}_m^i)}{h_c A_c [\overline{T}_{cs}(\varepsilon) - T_r]} \quad (\text{Ec. 11})$$

Para valores $0 \leq \varepsilon \leq t_{er}$.

Para el moldeo de una parte de plástico específica, se predeterminan el material polimérico correspondiente, el volumen de pieza y los parámetros de procesamiento. Es decir, el C_p , ρ_p , V_p , \overline{T}_p^i , \overline{T}_p , \overline{T}_m , \overline{T}_m^i en la ec. (11) pueden considerarse constantes. Por lo tanto, el t_{er} depende principalmente de los parámetros C_m , ρ_m , V_m , A_c y T_r . Para mejorar la eficiencia de enfriamiento del molde es decir, acortar el valor de t_{er} en la ec. (11), se necesita disminuir los valores de C_m , ρ_m , V_m y T_r y/o aumentar los valores de h_c y A_c , es decir, reduciendo el volumen del molde se puede lograr una mejor eficiencia en las etapas de calentamiento y enfriamiento. Además, la eficiencia de enfriamiento del molde puede mejorarse adicionalmente aumentando el caudal de refrigerante, bajando la temperatura del

refrigerante y aumentando el área de enfriamiento del molde.

3. Análisis térmico y térmico-estructural

El análisis térmico transitorio y el análisis térmico-estructural se implementaron con base al software comercial ANSYS para analizar la respuesta térmica y la resistencia estructural del MRTR. Para MRTR, el sistema de calentamiento por resistencias eléctricas se puede utilizar para un calentamiento uniforme y eficiente, para partes de forma simples y complejas. La Figura 3(a) muestra la geometría total del inserto de la cavidad que será calentado, en

la Figura 3(b), se observa la simplificación de la geometría para la simulación térmico-estructural, esta simplificación es el resultado de la parte central de la probeta de tensión (cuello de la probeta), que es donde se concentra los esfuerzos y la falla mecánica. En esta ilustración a , h , y q representan la distancia de centro a centro de las resistencias, la altura del centro de la resistencia a la superficie de la cavidad y el flujo de calor por unidad de área, respectivamente.

El material del inserto de la cavidad implementado es un acero pre-endurecido (AISI P20) y sus propiedades físicas se mencionan en la Tabla 1 [7].

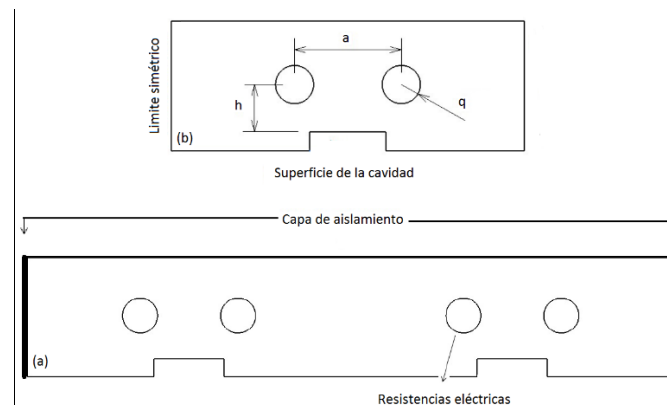


Figura 3. Geometría del inserto de la cavidad. (a) Geometría total del inserto de la cavidad. (b) Geometría simétrica para simulación.

Tabla 1 – Propiedades físicas del inserto del molde.

Propiedad física	Valor
Material	AISI P-20
Densidad	7850 kg/m ³
Calor específico	460 kJ/°C
Conductividad térmica	34 W/m °C
Módulo de elasticidad	205 GPa
Coefficiente de Poisson	0.285

3.1. Análisis de respuesta térmica

El modelo de malla y las condiciones de frontera en el análisis transitorio de transferencia de calor se muestran en la

Figura 4. Se considera la temperatura inicial del molde de 30 °C, equivalente a la temperatura del aire ambiente en el laboratorio. La condición de convección de aire libre se cargó en la superficie externa del molde y el coeficiente de transferencia de calor por convección correspondiente fue de 20 W/m²[25]. Para la parte lateral izquierda se implementó una condición de simetría que permite reducir el modelo de malla, y del lateral derecho se aplicó un flujo de calor cero por defecto debido a la capa de aislamiento. El medio para calentar el inserto del molde son las resistencias eléctricas.

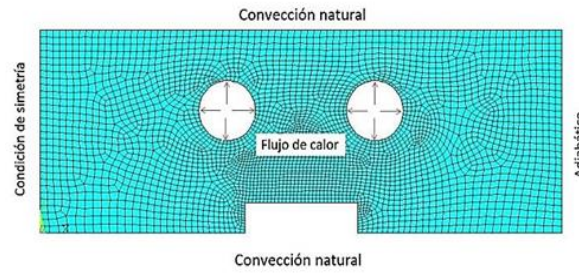


Figura 4. Modelo de malla y condiciones de frontera para análisis transitorio de transferencia de calor.

3.2. Análisis térmico-estructural

En las fases de llenado y empaquetamiento, la superficie de la cavidad del molde sufrirá una presión de cavidad grande. Por lo tanto, el molde debe ser lo suficientemente fuerte para reducir la deformación de la superficie de la cavidad y mejorar su vida útil. La posición de las resistencias eléctricas no sólo tiene un gran efecto sobre la eficiencia de respuesta térmica del molde, sino que también afecta significativamente su

resistencia estructural. Por ejemplo, situar las resistencias eléctricas mucho más cerca de la superficie del inserto puede aumentar la eficiencia de calentamiento, pero disminuir la resistencia estructural del mismo. Como resultado, es necesario estudiar el efecto de la posición de las resistencias eléctricas sobre la resistencia estructural del inserto. La Figura 5 muestra el modelo de malla y las condiciones de frontera para el análisis de resistencia estructural.

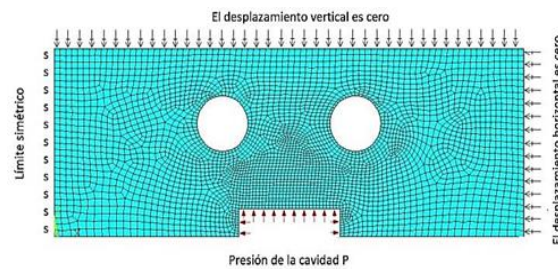


Figura 5. Modelo de malla y condiciones del análisis térmico-estructural.

En esta ilustración, P representa la presión de inyección, que se supone es de 80 MPa. En el límite izquierdo del modelo, la condición de simetría es implementada, en el límite derecho, el desplazamiento en la dirección normal es cero. Dado que los insertos de molde son soportados por la placa de retención para la fijación, el desplazamiento en el borde superior del modelo es también cero en la dirección vertical.

4. Trabajo experimental

Para estudiar la relación entre la posición de las resistencias eléctricas, la eficiencia de respuesta térmica, uniformidad de temperatura y resistencia estructural del MRTR, se utilizó la metodología de la superficie de respuesta combinada con la regresión mixta para obtener los correspondientes modelos matemáticos.

4.1. Análisis de respuesta térmica

El modelo de superficie de respuesta es una función analítica útil para describir la

relación numérica entre las variables experimentales controlables y las variables de respuesta. En MSR, la forma cuantitativa de relación entre las variables experimentales y la variable de respuesta deseada puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde Y representa la variable de respuesta, f es la función de respuesta desconocida, x_1, x_2, \dots, x_k son las variables experimentales independientes y ε es el error de ajuste que representa otras fuentes de variabilidad no contabilizadas para f . El objetivo principal del MSR es establecer una función aproximada entre los factores y las respuestas a través de una serie especial de experimentos y análisis estadístico. Para MSR, hay muchos modelos que se pueden utilizar para establecer las funciones para aproximaciones, pero el modelo más común es el polinomio basado en la expansión de la serie de Taylor. En este estudio, la aproximación de f será propuesta utilizando el modelo de regresión polinomial de segundo orden, que puede escribirse de la siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde β_0 es la constante del modelo; β_i representa el término lineal; β_{ii} denota el término cuadrático; β_{ij} es el término de interacción; k es el número de factores o variables; y ε es el error estadístico. Se debe implementar una serie de experimentos reales o de simulación para obtener los valores de la variable de respuesta, que se pueden registrar en el vector Y . La función aproximada entre las respuestas y los términos del modelo basados en el modelo

polinomial cuadrático puede escribirse en la forma matricial de la siguiente manera:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde X es una matriz de términos de modelo incluyendo los términos lineales, términos cuadrados y términos de interacción; β es un vector de columna que contiene los coeficientes de la pendiente; y ε es el vector de error residual. El MSR se basan en tres tipos de matrices de diseño de experimentos (DOE), incluyendo diseños de compuestos centrales (DCC), diseño de Box-Behnken (DBB) y estimación de error cuadrático medio integrado óptimo (EIMSE-óptimo). Para evaluar el vector de coeficiente de regresión β del modelo predictivo, se puede utilizar el método de mínimos cuadrados. Se puede describir con la siguiente ecuación en la forma matriz:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde X^T es la transpuesta de la matriz X . Para evitar la singularidad de la matriz $X^T X$, debe observarse que el número de puntos de diseño experimental debe ser mayor que el número de los coeficientes de la pendiente.

4.2. Diseño Box-Behnken

Para el diseño experimental, se seleccionó el método DBB porque ofrece un equilibrio razonable entre precisión de predicción y economía de ejecución. Requiere tres niveles de cada factor y es siempre de forma esférica. El tratamiento experimental para DBB en tres factores se muestra esquemáticamente en la Figura 6, en el bloque o cubo, un cierto número de puntos de diseño se colocan en los puntos medios de los bordes, mientras que los otros se mantienen en el centro del bloque.

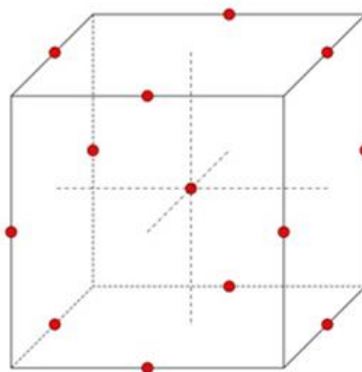


Figura 6. Diseño DBB para tres factores.

Como se muestra en Figura 3(b), la posición de las resistencias eléctricas está definida por tres variables: la distancia del centro de la resistencia a la superficie de la cavidad, h ; la distancia de centro a centro de las resistencias, a ; y el flujo de calor por unidad de área, q . Por lo tanto, se eligió un diseño de ensayo Box-Behnken con 17 ensayos para tres factores y tres niveles. Entre los ensayos experimentales, 12 ensayos estaban en el borde del cubo del espacio experimental y los otros se replicaron en el centro del cubo espacial.

Los rangos de los tres factores se pueden definir basándose en la experiencia previa y el análisis de ingeniería. Los tres niveles de los factores se enumeran en la Tabla 2, "-1", "0" y "+1" representan los niveles bajo, medio y alto de los factores, respectivamente. El diseño del experimento basado en DBB para un 3^3 factorial inicia con cinco puntos centrales se puede ver en la Tabla 3.

El polímero inyectado es un PADMEX 60120-U suministrado por la empresa PEMEX, el cual presenta una T_c de 116 °C [26,24], temperatura que se utiliza para evaluar la eficiencia de calentamiento en el presente trabajo. El esfuerzo máximo de Von Mises, σ_v , ejercido sobre el molde se utilizó para evaluar la resistencia estructural. La diferencia de las

temperaturas máxima y mínima superficial del molde, t_d .

Tabla 2. Niveles de los factores.

Factor	Nivel -1	Nivel 0	Nivel +1
h (mm)	8.00	10.00	12.00
a (mm)	13.00	17.00	21.00
q (W/m^2)	1.00	2.00	3.00

5. Resultados y discusión

De acuerdo con el resultado de DBB, se realizaron análisis de respuesta térmica y análisis de resistencia estructural basado en análisis de elementos finitos (FEA) para obtener los valores de las diferentes variables de respuesta. Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 3. Las variables de respuesta obtenidas de los experimentos se analizaron por regresión múltiple lineal para determinar los modelos matemáticos polinomiales de segundo orden con mejores resultados.

La adecuación y fiabilidad de los modelos de regresión se probaron mediante el análisis de varianza (ANOVA).

5.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Se aplicó un ANOVA para examinar la importancia de los términos del modelo cuadrático. Los resultados del ANOVA para el modelo cuadrático del tiempo de calentamiento requerido, t_{cr} , se presentan

en la Tabla 4. La suma de cuadrados en la tabla se refiere a la suma de cuadrados para cada término, que mide la variabilidad en los datos aportados por el término. DF representa el número de términos que contribuirán a la predicción del error.

Tabla 3. Resultados del análisis de los puntos experimentales seleccionados.

No. de exp.	h (mm)	a (mm)	q (W/m ²)	t_{cr} (s)	t_d (s)	σ_v (MPa)
1	10	17	2	37.27	479	7.647
2	10	13	3	19.345	403	16.775
3	8	21	2	39	527	1.693
4	10	17	2	37.27	475	7.646
5	12	17	3	25.45	510	10.705
6	8	13	2	27.9	406	14.029
7	10	17	2	37.27	477	7.643
8	12	13	2	36.855	467	11.204
9	8	17	1	80.45	519	3.501
10	10	17	2	37.268	477	7.643
11	8	17	3	19.8	456	8.01
12	10	21	3	26.64	521	4.666
13	10	21	1	88.8	534	1.882
14	10	13	1	79.75	460	6.496
15	10	17	2	37.265	479	7.647
16	12	17	1	87.2	500	4.02
17	12	21	2	43.6	529	4.648

El valor del modelo F de 19629.18 indica que el modelo se considera estadísticamente significativo. Los valores de Valor P inferiores a 0.0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso A, B, C, AB, AC, BC, A² y C² son términos de modelo significativos. La *R-Cuadrada de la predicción* es de 0.9995 está en un acuerdo razonable con la *R-Cuadrada ajustada* de 0.9999. La *Precisión adecuada*

mide la relación señal/ruido. Es deseable una relación mayor que 4. La relación de 403.567 lo que indica una señal adecuada. Este modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

Los resultados del ANOVA para el modelo cuadrático de los esfuerzos de Von Mises, σ_v , se presentan en la Tabla 5. El valor del modelo F de 121.40 implica que este es significativo.

Tabla 4. ANOVA para el tiempo de calentamiento requerido.

Fuente	Sum. de cuadrados	DF	M. de Cuadrado	Valor F	Valor P (Prob>F)
Modelo	8870.31	8	1108.79	19629.1	< 0.0001
A-h	84.21	1	84.21	1490.75	< 0.0001
B-a	146.12	1	146.12	2586.79	< 0.0001
C-q	7500.98	1	7500.98	1.3E+5	< 0.0001
AB	4.74	1	4.74	83.94	< 0.0001
AC	0.30	1	0.30	5.36	0.0494
BC	0.77	1	0.77	13.63	0.0061
A ²	0.74	1	0.74	13.18	0.0067
C ²	1132.17	1	1132.17	20043.0	< 0.0001

Residual	0.45	8	0.056	
F. de ajuste	0.45	4	0.11	
Error puro	1.92E-5	4	4.8E-006	
Total	8870.76	16		
Desv. Est.	0.24		<i>R-Cuadrada</i>	0.9999
Media	44.77		<i>R-Cuadrada ajustada</i>	0.9999
C.V.%	0.53		<i>R-Cuadrada de la predicción</i>	0.9995
PRESS	4.53		<i>Precisión adecuada</i>	403.567

Los valores de Valor P inferiores a 0.0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso A, B, C, AB,

AC, BC, A², B² y C² son términos de modelo significativos.

Tabla 5. ANOVA para los esfuerzos de Von Mises.

Fuente	Sum. de cuadrados	DF	M. de Cuadrado	Valor F	Valor P (Prob>F)
Modelo	24262.79	9	2695.87	121.40	< 0.0001
A-h	1200.50	1	1200.50	54.06	0.0002
B-a	17578.13	1	17578.13	791.55	< 0.0001
C-q	1891.13	1	1891.13	85.16	< 0.0001
AB	870.25	1	870.25	39.19	0.0004
AC	1332.25	1	1332.25	59.99	0.0001
BC	484.00	1	484.00	21.79	0.0023
A ²	491.12	1	491.12	22.12	0.0022
B ²	149.06	1	149.06	6.71	0.0359
C ²	272.85	1	272.85	12.29	0.0099
Residual	155.45	7	22.21		
F. de ajuste	144.25	3	48.08		
Error puro	11.20	4	2.80		
Total	24418.24	16			
Desv. Est.	4.71		<i>R-Cuadrada</i>		0.9936
Media	483.47		<i>R-Cuadrada ajustada</i>		0.9854
C.V.%	0.97		<i>R-Cuadrada de la predicción</i>		0.9048
PRESS	2325.50		<i>Precisión adecuada</i>		34.689

La *R-Cuadrada de la predicción* de 0.9048 está en un acuerdo razonable con la *R-Cuadrada ajustada* de 0.9854. La *Precisión adecuada* mide la relación señal/ruido. Es deseable una relación mayor que 4. La relación de 34.689 lo que indica una señal adecuada. Este modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

Los resultados del análisis de ANOVA para la diferencia de las temperaturas máxima y

mínima superficial del molde, t_d , se presentan en la Tabla 6. El valor del modelo F es de 83.76 implica que el modelo es significativo. Los valores de Valor P inferiores a 0.0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso B, C, AB, B y C² son términos de modelo significativos.

Tabla 6. ANOVA para la diferencia de las temperaturas máxima y mínima superficial del molde.

Fuente	Sum. de cuadrados	DF	M. de Cuadrado	Valor F	Valor P (Prob>F)
Modelo	258.27	6	43.05	83.76	< 0.0001
A-h	1.40	1	1.40	2.72	0.1301
B-a	158.55	1	158.55	308.52	< 0.0001
C-q	73.55	1	73.55	143.12	< 0.0001
AB	8.35	1	8.35	16.25	0.0024
BC	14.04	1	14.04	27.33	0.0004
C ²	2.37	1	2.37	4.62	0.0571
Residual	5.14	10	0.51		
F. de ajuste	5.14	6	0.86		
Error puro	1.68E-5	4	4.2E-6		
Total	263.41	16			
Desv. Est.	0.72			<i>R-Cuadrada</i>	0.9805
Media	7.40			<i>R-Cuadrada ajustada</i>	0.9688
C.V.%	9.68			<i>R-Cuadrada de la predicción</i>	0.9128
PRESS	22.97			<i>Precisión adecuada</i>	32.538

La *R-Cuadrada de la predicción* de 0.9128 está en un acuerdo razonable con la *R-Cuadrada ajustada* de 0.9688. La *Precisión adecuada* mide la relación señal/ruido. Es deseable una relación mayor que 4. La relación de 32.538 indica una señal adecuada. Este modelo se puede utilizar para navegar por el espacio de diseño.

5.2. Modelo de regresión de las respuestas

Los modelos de regresión de la superficie de respuesta para evaluar el tiempo de calentamiento requerido, los esfuerzos máximos de Von Mises y la variación de la temperatura superficial del molde se expresan como:

$$t_{cr} = 89.50898 + 6.31006 * h + 2.64875 * a - 92.88152 * q - 0.13609 * h * a - 0.13750 * h * q - 0.10969 * a * q - 0.10496 * h^2 + 16.37514 * q^2 \quad (\text{Ec. 16})$$

$$\sigma_v = 404.97188 - 34.78125 * h + 37.30 * a - 188.575 * q - 1.84375 * h * a + 9.125 * h * q + 2.750 * a * q + 2.7 * h^2 - 0.37187 * a^2 + 8.050 * q^2 \quad (\text{Ec. 17})$$

$$t_d = 30.30643 - 2.86162 * h - 1.98234 * a + 13.99028 * q + 0.18062 * h * a - 0.46844 * a * q - 0.74868 * q^2 \quad (\text{Ec. 18})$$

Los modelos listados anteriormente pueden usarse para predecir el tiempo de calentamiento requerido, t_{cr} , los esfuerzos máximos de Von Mises, σ_v , y la variación de la temperatura superficial del molde, t_d .

6. Optimización del sistema de calentamiento.

Según el planteamiento anterior, se podría concluir que la posición las resistencias eléctricas tiene efectos significativos y complejos sobre la eficiencia de calentamiento, la uniformidad de temperatura de la cavidad del molde y la resistencia del molde. Dado que la productividad es un indicador importante en la industria de moldeo por inyección, se desea que el tiempo de calentamiento sea lo más corto posible. Por lo tanto, el propósito de esta optimización es minimizar el tiempo de calentamiento requerido para mejorar la eficiencia de calentamiento. Al mismo tiempo, la variación de la temperatura de la superficie del molde de acuerdo a la norma ASTM-D 3641-02 [28] y D 4703-03 [29] debe ser inferior a 5 °C para garantizar la calidad de la superficie de la pieza. Los esfuerzos máximos de Von Mises no deben ser superiores a 500 MPa. Además, los valores de las tres variables de diseño están todos en el espacio de diseño designado,

como se muestra en la Tabla 3. El problema de optimización se puede representar mediante las siguientes ecuaciones:

- Encontrar: h, a, q
- Minimizar: $t_{cr}(h, a, q)$ **(Ec. 19)**

- Sujeto a restricciones: $t_d(h, a, q) \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $\sigma_v(h, a, q) \leq 500 \text{ MPa}$ **(Ec. 20)**

- Dentro de los rangos: $8\text{mm} \leq h \leq 12\text{mm}$; $13\text{mm} \leq a \leq 21\text{mm}$; $1w/m^2 \leq q \leq 3w/m^2$ **(Ec. 21)**

El problema de optimización expresado con las ecuaciones anteriores se resolvió acoplando los modelos matemáticos desarrollados con el algoritmo PSO. El diagrama de flujo del diseño de optimización se muestra en la Figura 7. Los valores de las variables dependientes y las variables de respuesta correspondientes

antes y después de la optimización se presentan en la Tabla 7.

Se puede observar que el tiempo de calentamiento requerido optimizado de 22.46 s representa una reducción de 39.71 % en comparación con el tiempo de calentamiento requerido inicial de 37.265 s, la variación de la temperatura de la superficie del molde se mejora aproximadamente 34.616 % del valor de referencia de 7.647 °C al valor optimizado de 4.999 °C, y el esfuerzo máximo de Von Mises aumenta 2.27 % con respecto al valor inicial de 479 MPa, quedando en 492.04 MPa, aun así, por debajo del valor predefinido en la optimización mediante PSO.

Se realizó la simulación respuesta térmica y el análisis térmico-estructural con el parámetro optimizado para validar los resultados en la optimización.

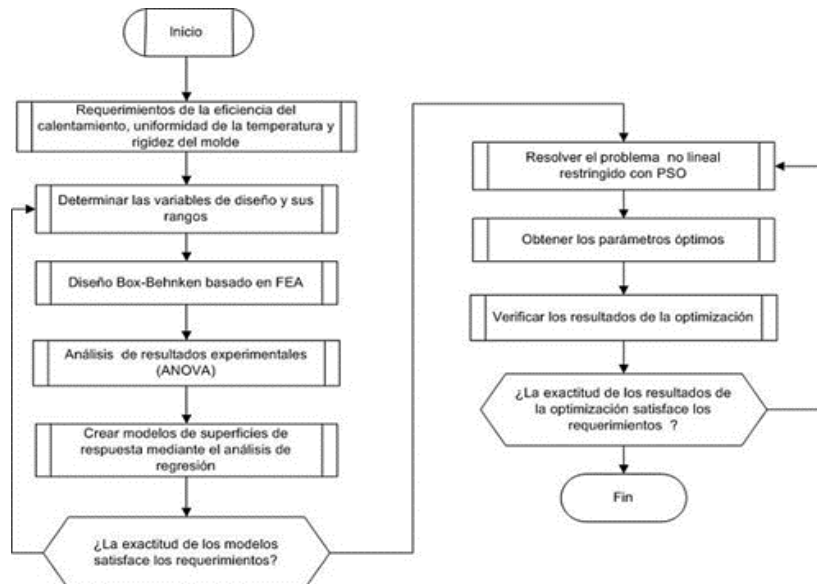


Figura 7. Metodología de diseño óptimo utilizando FEM-MSR-PSO.

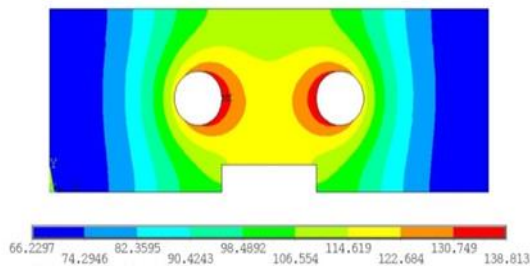
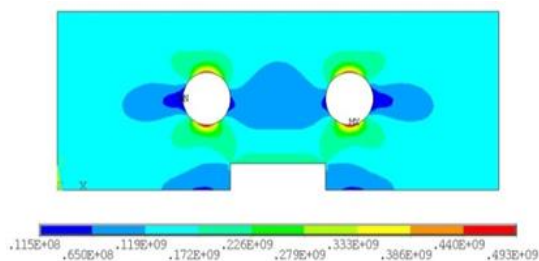
Los resultados de la simulación muestran que el tiempo de calentamiento requerido, la variación de la temperatura superficial

del molde y los esfuerzos máximos de Von Mises son 23.125 s, 4.825 °C y 493 MPa, respectivamente.

Tabla 7 –Niveles de los factores.

Parámetros	h	a	q	t_{cr}	t_d	σ_v
	mm	mm	w/m ²	s	°C	MPa
V. inicial	10.0	17.00	2.00	37.265	7.647	479.000
V. optimizado	8.0	18.03	2.82	22.465	4.990	492.042

Los valores en porcentaje de errores entre los valores optimizados y experimentales de t_{cr} , t_d y σ_v son 2.935 %, 3.49 %, 0.194 %, respectivamente. Las gráficas de contorno de la distribución de la temperatura y la distribución de esfuerzos de Von Mises basada en los parámetros óptimos se muestran en las Figura 8 y Figura 9, respectivamente.

**Figura 8.** Gráficas de contorno de la distribución de la temperatura.**Figura 9.** Esfuerzos de Von Mises.

7. Conclusiones.

En este trabajo se investigó la respuesta térmica y la resistencia estructural del MRTR por análisis térmico y térmico-estructural mediante el método de elemento finito. Los resultados del análisis térmico muestran que el molde de inyección tiene la capacidad potencial para ser calentado rápida y uniformemente usando resistencias

eléctricas. Los resultados del análisis de campos acoplados térmico-estructural indican que la distribución de los esfuerzos en el bloque de la cavidad es muy desigual. Existen grandes concentraciones de esfuerzos en los bordes de las resistencias eléctricas cerca de la superficie de la cavidad del molde. Tal concentración de esfuerzo y relajación durante el proceso de calentamiento y enfriamiento frecuente en el MRTR puede conducir a la iniciación de la microfisura en el orificio donde se posiciona la resistencia eléctrica y se podría extender hasta la fatiga térmico-mecánica después de ciertos ciclos de moldeo.

Por lo tanto, la posición de las resistencias de calentamiento es muy crucial para el MRTR y debe ser cuidadosamente diseñado considerando la eficiencia de la respuesta térmica, la uniformidad de temperatura y la resistencia estructural del MRTR. La metodología de superficie de respuesta (MSR) basada en el diseño experimental de Box-Behnken y la simulación numérica (FEA) se utilizó para explorar la relación numérica entre los parámetros de diseño y las variables de respuesta.

Se implementó el método PSO para acoplar los modelos matemáticos desarrollados para encontrar las variables de diseño óptimas para minimizar el tiempo de calentamiento requerido y, al mismo tiempo, asegurar la uniformidad de temperatura aceptable en la superficie de la cavidad del molde y su resistencia estructural. Se obtuvo la posición óptima de las resistencias eléctricas en el molde para probetas de tensión, se predijeron y verificaron los valores mínimos de t_{cr} , t_d y σ_v realizando experimentos de confirmación. Después de la optimización,

el tiempo de calentamiento requerido se redujo en 39.71 %, la uniformidad de la temperatura superficial de la cavidad se mejoró en 34.61 %, y la resistencia estructural del bloque también se mejoró ligeramente 2.72 %. Los modelos de superficie de respuesta cuadrática desarrollados pueden obtener resultados razonables con errores de menos de 4 % entre los datos predichos y los experimentales en experimentos de confirmación. Estos modelos pueden utilizarse para describir la relación entre factores experimentales (h , a y q) y variables de respuesta (t_{cr} , t_d y σ_v).

El método de optimización desarrollado por el acoplamiento FEM-MSR-PSO ha demostrado ser eficaz y ser una herramienta poderosa para guiar el diseño de optimización de la posición de las resistencias eléctricas del MRTR, los resultados obtenidos mediante simulación muestran la reducción del tiempo de ciclo de moldeo, la etapa de la manufactura del molde confirmará los resultados obtenidos y si así se logrará rendimiento en la producción y la vida útil del MRTR.

Agradecimientos.

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca doctoral No. 428731.

Referencias.

- [1] M. Kutz, 2017, Applied plastics engineering handbook. Processing, materials and applications, United Kingdom: William Andrew, 2nd ed., Elsevier, Ed. Oxford, p. 318.
- [2] P. Kennedy and R. Zheng, 2013, Flow analysis of injection molds., 2nd ed. Munich, Germany: Hanser, p. 52.
- [3] J. Shoemaker, 2006, Moldflow design guide: a resource for plastics engineers, First Edition ed. Massachusetts, U.S.A.: Hanser Verlag, p. 11-31.
- [4] W. Wang, G. Zhao, Y. Guan, X. Wu, and Y. Hui. "Effect of rapid heating cycle injection mold temperature on crystal structures, morphology of polypropylene and surface quality of plastic parts", Journal of Polymer Research, vol. 22, no 5, 2015, p. 84.
- [5] G. Zhao, G. Wang, Y. Guan, and H. Li, "Research and application of a new rapid heat cycle molding with electric heating and coolant cooling to improve the surface quality of large LCD TV panels", Polymers for Advanced Technologies, vol. 22, no. 5, 2011, p. 476-487.
- [6] C. L. Xiao and H. X. Huang, "Multiobjective optimization design of heating system in electric heating rapid thermal cycling mold for yielding high gloss parts", Journal of Applied Polymer Science, vol. 131, no. 6, 2014.
- [7] C. L. Xiao and H. X. Huang, "Development of a rapid thermal cycling molding with electric heating and water impingement cooling for injection molding applications" Applied Thermal Engineering, vol. 73, no. 1, 2014, p. 712-722.
- [8] S. C. Chen, W. R. Jong, and J. A. Chang, "Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line," Journal of Applied Polymer Science, vol. 101, no. 2, 2006, p. 1174-1180.
- [9] D. Yao, T. E. Kimerling, and B. Kim, "High-frequency proximity heating for injection molding applications" Polymer Engineering & Science, vol. 46, no. 7, 2006, p. 938-945.
- [10] P. C. Chang and S. J. Hwang, "Experimental investigation of infrared rapid surface heating for injection

molding", *Journal of applied polymer science*, vol. 102, no. 4, 2006, p. 3704-3713.

[11] S. C. Chen, P. S. Minh, and J. A. Chang, "Gas-assisted mold temperature control for improving the quality of injection molded parts with fiber additives", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, no. 3, 2011, p. 304-312.

[12] R. X. Xu and E. Sachs, "Rapid thermal cycling with low thermal inertia tools", *Polymer Engineering & Science*, vol. 49, no. 2, 2009, p. 305-316.

[13] G. Wang, G. Zhao, H. Li, and Y. Guan, "Research on a new variotherm injection molding technology and its application on the molding of a large LCD panel", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 48, no. 7, 2009, p. 671-681.

[14] H. L. Chen, R. D. Chien, and S. C. Chen, "Using thermally insulated polymer film for mold temperature control to improve surface quality of microcellular injection molded parts", *International communications in heat and mass transfer*, vol. 35, no. 8, 2008, p. 991-994.

[15] X. P. Li, G. Q. Zhao, Y. J. Guan, and M. X. Ma, "Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm", *Materials & Design*, vol. 30, no. 10, 2009, p. 4317-4323.

[16] H. X. Huang, J. C. Li, D. Li, and G. Q. Huang, "New strategies for predicting parison dimensions in extrusion blow molding" *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 50, no. 13, 2011, p. 1329-1337.

[17] C. Shen, L. Wang, and Q. Li, "Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method" *Journal of Materials Processing*

Technology, vol. 183, no. 2, 2007, p. 412-418.

[18] F. Marini, and B. Walczak, "Particle swarm optimization (PSO). A tutorial" *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 149, 2015, p.153-165.

[19] Standard, A.S.T.M. D638-03, *Standard Practice for Compression Molding Thermoplastic Materials into Test Specimens, Plaques, or Sheets*, 2003.

[20] W. Wang, G. Zhao, Y. Guan, X. Wu, and Y. Hui, "Effect of rapid heating cycle injection mold temperature on crystal structures, morphology of polypropylene and surface quality of plastic parts," *Journal of Polymer Research*, vol. 22, no. 5, April 2015, p. 84.

[21] D. Yao, S. C. Chen, and B. H. Kim, "Rapid thermal cycling of injection molds: an overview on technical approaches and applications", *Advances in Polymer Technology*, vol. 27, no. 4, 2008, pp. 233-255.

22 G. Menges, W. Michaeli, and P. Mohren, 2001. *How to Make Injection Molds*. 3rd edn. Hanser Gardner Pubns.

[23] S. J. Park and T. H. Kwon, "Optimal cooling system design for the injection molding process" *Polymer Engineering & Science*, vol. 38, no. 9, 1998, p. 1450-1462.

[24] N. S. Rao, G. Schumacher, and N. R. Schott, K. T. O'brien, "Optimization of cooling systems in injection molds by an easily applicable analytical model" *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 21, no. 5, 2002, p. 451-459.

[25] Y. A. Cengel, and M. A. Boles, 2002, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, p. 152.

[26] A. Dorigato, M. D'Amato, and A. Pegoretti, "Thermo-mechanical properties

of high density polyethylene-fumed silica nanocomposites: effect of filler surface area treatment," *Journal of Polymer Research*, vol. 19, no. 6, 2012, p. 9889.

[27] A. Al Ashraf, "Thermal Analysis of Polymers (LDPE, HDPE) by Differential Scanning Calorimetry Technique" *Center for Advanced Materials*, vol. 2, 2015, p. 5.

[28] Standard, A.S.T.M.3641-02 Standard Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Materials, 2003.

[29] Standard A.S.T.M. D 4703-03 Standard Practice for Compression Molding Thermoplastic Materials into Test Specimens, Plaques, or Sheets. 2003.