

**ENERGY ANALYSIS OF MANUFACTURING PROCESS  
OF BIODEGRADABLE AGRICULTURAL FILMS**  
/  
**ANALIZA ENERGETICĂ A PROCESULUI DE FABRICAȚIE  
A FOLIILOR AGRICOLE BIODEGRADABILE**

Ph.D. Eng. Deac T.<sup>1)</sup>, Ph.D Stud. Eng. Nagy E. M.<sup>2)</sup>, Eng. Coța C.<sup>2)</sup>,  
Ph.D. Eng. Cioica N.<sup>2)</sup>, Eng. Gyorgy Z.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Technical University of Cluj-Napoca, Faculty of Mechanics / Romania; <sup>2)</sup>INMA Bucharest Branch of Cluj Napoca  
Tel: 0723798071; E-mail: teodora.deac@auto.utcluj.ro

**Abstract:** In recent years, in the agricultural sector the amount of low density non- biodegradable polyethylene film (PV) annually used has increased considerably. Thus, worldwide the researches have intensified in order to obtain films produced from renewable agricultural sources. The paper presents the results regarding a new method for manufacturing of biodegradable agricultural film from renewable resources and energy analysis process.

**Keywords:** energy analysis, agricultural film, biodegradable, renewable resources, the manufacturing process, energy consumption, extrusion lamination

#### INTRODUCTION

Worldwide, the volume of films used in agriculture has greatly increased in the last 10 years. The latest data show that agriculture and horticulture are responsible for approximately 1.500.000 t consumption of annual production of polymers in Europe. In the case of the thin films, in Europe are consumed more than 72.000 t / year as direct row covers, over 75.000 t / year films for culture in low tunnels and more than 130.000 t / year mulching films [7].

Currently, the market is still dominated by agriculture films obtained from low-density polyethylene (PE).

These films have two major disadvantages: they are manufactured from petroleum based raw materials and produce a large amount of waste that needs to be removed from the field and destroyed [6]. Non-degradable polymers accumulate on the ground creating serious problems for plastic waste management [8].

Also in their manufacturing process large amounts of energy that comes from conventional sources, are consumed.

So, besides the fact that it is an important source of waste with negative environmental impact, producing low density film is also conventional primary resource consuming [8].

An alternative solution to agricultural polyethylene film is the development and use of biodegradable plastics from renewable agricultural resources which break down completely in contact with microorganisms found in the soil [6]. In this way, we solve two problems of great importance for the environment: fossil resources are saved and emissions of greenhouse gases (GHG) are reduced [1].

At worldwide level, the research of biopolymers development has intensified. Since 1990s Germany has been financing research projects / development in the field of biodegradable thermoplastic manufacturing. The researches conducted have created a wide variety of biodegradable plastics [6].

**Rezumat:** În ultima perioadă în sectorul agricol cantitatea de folie din polietilenă de joasă densitate (PV), nebiodegradabilă, utilizată anual a crescut considerabil. Astfel pe plan mondial s-au intensificat cercetările de obținere a foliilor din surse agricole regenerabile. Lucrarea prezintă rezultatele obținute privind o nouă metodă de realizare de folii biodegradabile pentru agricultură din resurse regenerabile și analiza energetică a procesului.

**Cuvinte cheie:** analiză energetică, folii agricole biodegradabile, resurse regenerabile, proces de fabricație, consum energetic, extrudare, laminare

#### INTRODUCERE

Pe plan mondial, volumul foliilor pentru utilizare în agricultură a crescut foarte mult în ultimii 10 ani. Cele mai recente date arată că agricultura și horticultura sunt responsabile pentru un consum de aproximativ 1.500.000 t din producția anuală de polimeri din Europa. În ceea ce privește categoria foliilor subțiri, în Europa sunt consumate peste 72.000 t/an folii pentru acoperire directă pe rânduri, peste 75.000 t/an folii pentru culturi în tunele mici și mai mult de 130.000 t/an folii de mulcire [7].

În prezent, piața este încă dominată de foliile pentru agricultură obținute din polietilenă de joasă densitate (PE).

Aceste folii au două mari dezavantaje: sunt fabricate din materii prime pe bază de țiței și produc o mare cantitate de deșeuri care necesită a fi înlăturate de pe câmp și distruse [6]. Polimerii nedegradabili se acumulează pe sol creând probleme serioase de management a deșeurilor din plastic [8].

De asemenea, în procesul de fabricare a acestora se consumă cantități însemnate de energie care provine din surse convenționale.

Așadar pe lângă faptul că este o importantă sursă de deșeuri cu impact negativ asupra mediului, producerea foliilor de joasă densitate este și consumatoare de resurse primare convenționale [8].

O soluție alternativă viabilă la foliile agricole din polietilenă o constituie dezvoltarea și utilizarea plasticelor biodegradabile, provenite din resurse agricole regenerabile care se descompun complet în contact cu microorganismele aflate în sol [6]. În acest fel se rezolvă două probleme de mare importanță pentru mediu: se economisesc resursele fosile și se reduc emisiile de gaze cu efect de seră (GES) [1].

Astfel, la nivel mondial s-au intensificat cercetările în domeniul dezvoltării de biopolimeri. Încă din anii '90 Germania finanțează proiecte de cercetare/dezvoltare în domeniul producerii de termoplastic biodegradabil. În urma cercetărilor realizate au fost create o mare varietate de materiale din plastic biodegradabil [6].

However the energy consumption for producing films remains a problem because, in this case too, both in the extraction of raw materials process and in the manufacturing process the energy consumed comes also from fossil sources.

In this context, the main objective of the paper was to develop a theoretical mathematical model of analysis of energy consumption in the production process of agricultural biodegradable films and its application to determine the maximum energy consumption of the production process of agricultural biodegradable films using corn starch as raw material and the technology developed by INMA Bucharest, Branch of Cluj-Napoca. Thus, a theoretical model for analyzing energy consumption using systemic analysis method and applying mathematical model, has been developed, to determine the maximum consumed energy in the manufacturing of agricultural films from corn starch.

### MATERIAL AND METHOD

To develop the theoretical mathematical model for determining the energy consumption in the manufacturing process of biodegradable agricultural film the systemic analysis has been used. The manufacturing process was considered as a whole system ( $MPF$ ) and the phases were considered as subsystems of the considered system ( $MPF.F_i$ ) (Fig.1). The total energy consumed ( $E_{MPF}$ ) in manufacturing process of films is determined by the relation (1).

$$E_{MPF} = \sum_{i=1}^n E_{MPF.F_i} \quad (1)$$

$$E_{E_{MPF.F_i}} = \sum_{j=1}^k E_{MPF.F_i.j} \quad (2)$$

Where:

$E_{MPF}$  - total energy consumed in manufacturing process of biodegradable agricultural film [kWh/kg];

$E_{MPF.F_i}$  - energy consumed during  $i$  phase of the manufacturing process [kWh/kg];

$i = 1 \dots n$  phases of production.

By systemic analysis of the manufacturing process phases, each term of relationship (1) is divided into sub-terms of lower grade. The division of the terms in terms of lower level is performed in accordance with the phases, respectively, the activities of the technological process [7, 8] until the final relationships for determining the energy consumption (rel.2), result, which allow absolute quantification of energy consumption.

Where:

$E_{MPF.F_i.j}$  - energy consumed during the phase  $i$ , activity  $j$  of manufacturing process [kWh/kg];  $j = 1 \dots k$  activities of phase  $i$  of the process of production. To determine the components of relationship (2) it is necessary to analyze the technological process for manufacturing renewable agricultural film (Figure 1).

After analyzing the technological process, relation (1) became relation (3):

Totuși problema consumului de energie pentru producerea foliilor rămâne o problemă, deoarece și în acest caz atât în procesul de extracție a materiei prime cât și în procesul de fabricație energia consumată provine tot din surse de energie fosile.

În acest context, obiectivul principal a lucrării a fost de a realiza un model matematic teoretic de analiză a consumului energetic al procesului de fabricație a foliilor agricole biodegradabile și aplicarea acestuia pentru determinarea consumului energetic maxim al procesului de producere a foliilor agricole biodegradabile utilizând ca materie primă amidon de porumb și tehnologia dezvoltată în acest sens de către INMA București, Sucursala Cluj-Napoca. Astfel în lucrare s-a dezvoltat un model teoretic de analiză a consumului energetic utilizând metoda analizei sistemice și aplicarea modelului matematic pentru determinarea energiei maxime consumate în procesul de fabricație a foliilor agricole din amidon de porumb.

### MATERIAL ȘI METODĂ

Pentru dezvoltarea modelului matematic teoretic de determinare a consumurilor energetice a procesului de fabricare a foliilor agricole biodegradabile s-a utilizat analiza sistemică. Procesul de fabricație a fost considerat ca un întreg sistem ( $MPF$ ), iar fazele procesului au fost considerate ca subsisteme ale sistemului considerat ( $MPF.F_i$ ). Energia totală consumată ( $E_{MPF}$ ) în procesul de fabricație a foliilor se determină cu relația (1).

Unde:

$E_{MPF}$  - energia totală consumată în procesul de fabricație a foliilor agricole biodegradabile [kWh/kg];

$E_{MPF.F_i}$  - energia consumată în faza  $i$  a procesului de fabricație [kWh/kg];

$i = 1 \dots n$  fazele procesului de fabricație.

Prin analiza sistemică a fazelor procesului de fabricație, fiecare termen a relației 1, se divide în subtermeni de grad inferior.

Divizarea termenilor în termeni de grad inferior se realizează în concordanță cu fazele respectiv activitățile procesului tehnologic [7, 8] până când rezultă relațiile finale de determinare a consumurilor energetice (rel.2), care să permită cuantificarea consumurilor energetice în valoare absolută.

Unde:

$E_{MPF.F_i.j}$  - energia consumată în faza  $i$ , activitatea  $j$  a procesului de fabricație [kWh/kg];  $j = 1 \dots k$  activitățile fazei  $i$  a procesului de fabricație.

Pentru determinarea componentelor relației (2) este necesară analiza procesului tehnologic de fabricație a foliilor agricole din surse regenerabile (Figura 1).

În urma analizei procesului tehnologic relația (1) devine relația (3):

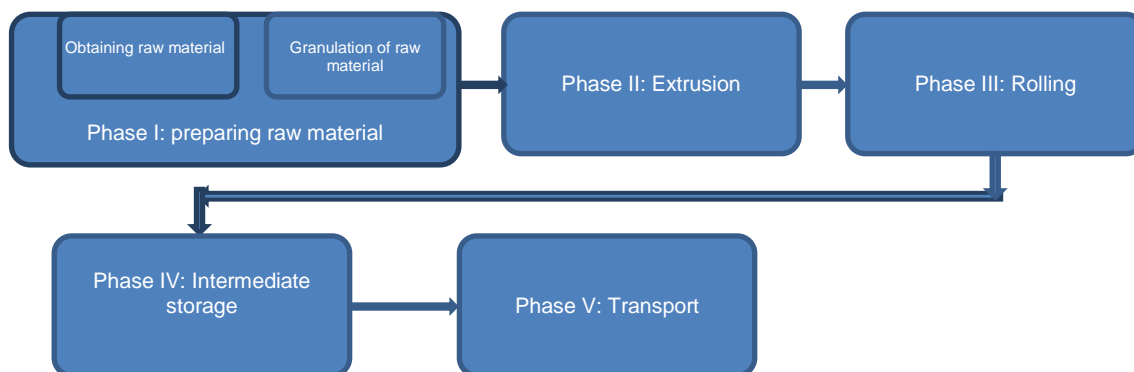


Fig.1 – Chart of technological process for manufacturing renewable agricultural film

$$E_{MPF.F} = E_{MPF.F_1} + E_{MPF.F_2} + E_{MPF.F_3} + E_{MPF.F_4} + E_{MPF.F_5} \quad (3)$$

$$E_{MPF.F_2} = E_{MPF.F_{2,1}} + E_{MPF.F_{2,2}} + E_{MPF.F_{2,3}} \quad (4)$$

Where:

$E_{MPF.F_1}$  - energy used for preparing raw material [kWh/kg];

$E_{MPF.F_2}$  - energy consumed in the process of dispensing, extrusion and widening the extruded material [kWh/kg];

$E_{MPF.F_3}$  - the energy consumed in the process of rolling [kWh/kg];

$E_{MPF.F_4}$  - energy consumed for intermediate storage [kWh/kg];

$E_{MPF.F_5}$  - energy consumed in intermediate transport phase (in manufacturing) and final transport (to the beneficiary) [kWh/kg].

The term 2 of relation (3) will further divide in terms of order 3 (relation 4).

Where:

$E_{MPF.F_{2,1}}$  - the energy used for dosing raw materials [kWh/kg];

$E_{MPF.F_{2,2}}$  - energy used for extrusion [kWh/kg];

$E_{MPF.F_{2,3}}$  - the energy use by widening matrix [kWh/kg].

Energy consumption for raw material dosage can be expressed by a final relation (relation 5):

Unde:

$E_{MPF.F_1}$  - energia consumată pentru prepararea materiei prime [kWh/kg];

$E_{MPF.F_2}$  - energia consumată în procesul de dozare, extrudare și lățire a materialului extrudat [kWh/kg];

$E_{MPF.F_3}$  - energia consumată în procesul de laminare [kWh/kg];

$E_{MPF.F_4}$  - energia consumată pentru depozitare intermediară [kWh/kg];

$E_{MPF.F_5}$  - energia consumată aferentă fazei de transport intermediar (în procesul de fabricație) și final (la beneficiar) [kWh/kg].

Termenul al 2-lea al relației (3) se va divide în continuare în termeni de ordinul 3 (relația 4).

Unde:

$E_{MPF.F_{2,1}}$  - energia consumată pentru dozarea materiei prime [kWh/kg];

$E_{MPF.F_{2,2}}$  - energia consumată pentru extrudare [kWh/kg];

$E_{MPF.F_{2,3}}$  - energia consumată de matricea de lățire [kWh/kg].

Energia consumată pentru dozarea materiei prime poate fi exprimată printr-o relație finală (relația 5):

$$E_{MPF.F_{2,1}} = \frac{E_d}{C_d} \quad (5)$$

$$E_{MPF.F_{2,2}} = E_{MPF.F_{2,2,1}} + E_{MPF.F_{2,2,2}} + E_{MPF.F_{2,2,3}} \quad (6)$$

$$E_{MPF.F_{2,2,1}} = \sum_{m=1}^p E_{MPF.F_{2,2,1,m}} \quad (7.1)$$

$$E_{MPF.F_{2,2,1,m}} = f(C_{ma}; C_{ex}; C_{hex}) \quad (7.2)$$

$$E_{MPF.F_{2,2,1}} = \frac{C_{hc}}{D_{hex}} \quad (7.3)$$

Where  $E_d$  is hourly energy consumption of the dispenser [kWh];  $C_d$  - hourly production capacity of the dosing feeder [kg/h].

The energy consumed by the extrusion equipment will divide in terms of lower order (relation 6).

Where:  $E_{MPF.F_{2,2,1}}$  is the energy used to run the extrusion screws [kWh/kg];

unde:  $E_d$  este consumul energetic orar al dozatorului [kWh];  $C_d$  - capacitatea de producție orară a dozatorului [kg/h].

Energia consumată de echipamentul de extrudare se va divide în termeni de ordin inferior (relația 6).

Unde:  $E_{MPF.F_{2,2,1}}$  este energia consumată pentru acționarea melcilor de extrudare [kWh/kg];

$E_{MPF.F2.2.2}$  - energy consumed by heating system [kWh/kg];

$E_{MPF.F2.2.3}$  - energy consumed by cooling system [kWh / kg].

Terms from relation 6 are divided further in lower order terms (relations 7.1; 7.2, 7.3, 8, 9)

Where:  $E_{MPF.F2.2.1.m}$  is energy consumed per each area of the extruder cylinder [kWh/kg];  $m = 1...p$  – identification coefficient of extruder cylinder areas [kWh/kg].

Also in relation (7.2):

$C_{ma}$  is dependence coefficient on thermo-physics characteristics of the material;

$C_{ex}$  - coefficient depending on the characteristics of the extrusion cylinder;

$C_{hex}$  - the productivity of the extruder [kg / h];

$T_{ex}$  - Extrusion temperature [°C];  $T_{ex} = f(C_{ma})$ .

The relation (7.1) can be quantified by relation (7.3), where:

$C_{hc}$  – total energy consumption for driving extrusion screws [kWh];

The energy consumed by the heating system  $E_{MPF.F2.2.2}$ , and cooling system  $E_{MPF.F2.2.3}$  is influenced by extrusion temperature and technical characteristics of the plants (relation (8.1)), and can be quantified using relations (9.1), (9.2), where:

$E_{MPF.F2.2.2}$  - energia consumată de instalația de încălzire [kwh/kg];

$E_{MPF.F2.2.3}$  - energia consumată de instalația de răcire [kwh/kg].

Termenii relației 6 se divid în continuare în termeni de ordin inferior (relațiile 7.1; 7.2, 7.3; 8, 9):

Unde:  $E_{MPF.F2.2.1.m}$  este energia consumată pe fiecare zonă a cilindrilor extruderului [kwh/kg];  $m=1...p$  – coeficient de identificare a zonelor cilindrilor de extrudare [kwh/kg].

De asemenea în relația (7.2):

$C_{ma}$  este coeficient de dependență de caracteristicile termo-fizice ale materialului;

$C_{ex}$  - coeficient de dependență de caracteristicile cilindrilor de extrudare;

$C_{hex}$  – productivitatea extruderului [kg/h];

$T_{ex}$  – temperatura de extrudare [°C];  $T_{ex}= f(C_{ma})$ .

Relația (7.1) se poate cuantifica prin relația (7.3), unde:

$C_{hc}$  – consumul orar total de energie pentru antrenarea melcilor de extrudare [kwh];

Energia consumată de instalația de încălzire  $E_{MPF.F2.2.2}$ , respectiv răcire  $E_{MPF.F2.2.3}$  este influențată de temperatura de extrudare și caracteristicile tehnice ale instalațiilor (relația (8.1)) și se poate cuantifica utilizând relațiile (9.1), (9.2), unde:

$$E_{MPF.F2.2.3} = f(T_{ex}, C_i) \quad (8)$$

$$E_{MPF.F2.2.2} = \frac{C_{hi}}{D_{hex}} \quad (9.1)$$

$$E_{MPF.F2.2.2} = \frac{C_{hr}}{D_{hex}} \quad (9.2)$$

$$E_{MPF.F2.3} = \frac{C_{hml}}{D_{hml}} \quad (10)$$

$C_i$  - coefficient depending on the characteristics of the heating / cooling system;

$C_{hi}$  - hourly energy consumption of the heating system [kWh];

$C_{hr}$  - hourly energy consumption of the cooling system, [kWh].

The energy consumed by the widening area can be quantified using the relationship 10, where:

$C_{hml}$  - hourly electricity consumption for the widening matrix [kWh];

$D_{hml}$  - hourly production capacity for widening matrix [kg / h].

$C_i$  – coeficient de dependență de caracteristicile instalației de încălzire/răcire;

$C_{hi}$  – consumul de energie orar al instalației de încălzire [kwh];

$C_{hr}$  – consumul orar de energie al instalației de răcire [kwh].

Energia consumată de matricea de lățire se poate cuantifica utilizând relația 10, unde:

$C_{hml}$  este consumul orar de energie electrică a matricei de lățire [kWh];

$D_{hml}$  – capacitatea de producție orară a matricei de lățire [kg/h].

$$E_{MPF.F3} = E_{MPF.F3.1} + E_{MPF.F3.2} + E_{MPF.F3.3} \quad (11)$$

$$E_{MPF.F3} = \frac{C_{hv} + C_{hli} + C_{hlr}}{D_{hl}} \quad (12)$$

$$E_{MPF.F4} = \frac{N_d \cdot C_d}{M_d} \quad (13)$$

$$E_{MPF.F5} = \frac{N_t \cdot C_{cb} \cdot H_{cb}}{M_f} \quad (14)$$

The energy consumption of the rolling equipment  $E_{MPF.F3}$  will divide in terms of lower order (relation 11), where:

$E_{MPF.F3.1}$  - is energy consumed by driving of laminating rollers [kWh];

$E_{MPF.F3.2}$  respectively  $E_{MPF.F3.3}$  - the energy consumed for heating or cooling system [kWh].

The relation (11) can be quantified by the equation 12, where:

$C_{hv}$  - hourly electricity consumption for laminating rollers [kWh];

$C_{hli}$  - hourly electricity consumption of the heating system of the rolling equipment [kWh];

$C_{hl}$  - hourly electricity consumption for cooling system of the rolling equipment [kWh];

$D_{hml}$  - rolling equipment hourly production capacity [kg/h].

Energy for intermediate storage is determined by the relation (13), where:

$N_d$  - is number of storage days;

$C_d$  - energy requirement for optimal warehouse  $C_d = C_{d1} + C_{d2}$  [kWh];  $C_{d1}$  - energy consumed to illuminate the deposit [kWh];  $C_{d2}$  - energy consumed for heating deposit [kWh];

$M_d$  - total amount of deposited material [kg/h]

Energy for transport is determined by the relation (14), where:

$N_t$  - is transport distance [km];

$C_{cb}$  - fuel consumption [l / km];

$H_{cb}$  - calorific value of the fuel [kW / l];

$M_f$  - the amount of material transported [kg].

Energia consumată de echipamentul de laminare  $E_{MPF.F3}$  se va divide în termeni de ordin inferior (relația 11), unde:

$E_{MPF.F3.1}$  - este energia consumată cu antrenarea valțurilor de laminare [kWh];

$E_{MPF.F3.2}$  și respectiv  $E_{MPF.F3.3}$  - energia consumată de instalația de încălzire respectiv răcire [kWh].

Relația (11) poate fi cuantificată prin relația 12, unde:

$C_{hv}$  este consumul orar de energie electrică a valțurilor de laminare [kWh];

$C_{hli}$  - consumul orar de energie electrică a instalației de încălzire a laminatorului [kWh];

$C_{hl}$  - consumul orar de energie electrică a instalației de răcire a laminatorului [kWh];

$D_{hml}$  - capacitatea de producție orară a laminatorului [kg/h].

Energia consumată cu depozitarea intermediară se determină cu relația (13), unde:

$N_d$  - este numărul de zile de depozitare;

$C_d$  - energia necesară funcționării optime a depozitului  $C_d = C_{d1} + C_{d2}$  [kWh];  $C_{d1}$  - energia consumată pentru iluminarea depozitului [kWh];  $C_{d2}$  - energia consumată pentru încălzirea depozitului [kWh];

$M_d$  - cantitatea totală de material depozitată [kg/h]

Energia consumată cu transportul se determină cu relația (14), unde:

$N_t$  - este distanța de transport [km];

$C_{cb}$  - consumul de carburant [l/km];

$H_{cb}$  - puterea calorică a carburantului [kW/l];

$M_f$  - cantitatea de material transportată [kg].

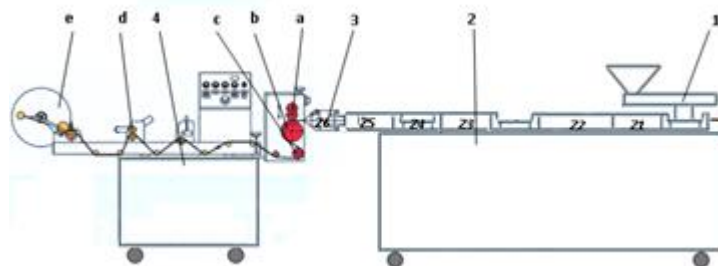


Fig. 2 -Installation for extrusion and rolling

## RESULTS

General mathematical method developed was applied to determine the energy consumption of manufacture of biodegradable agricultural film using the system developed for this purpose by INMA Bucharest, Branch of Cluj-Napoca (fig.2). To determine the energy consumption of the process, a simplified mathematical model will be applied, taking into account only the actual two phases of the manufacturing process: extrusion and laminating respectively.

The manufacturing process of biodegradable agricultural film for which the mathematical method developed was applied, was developed under the following conditions: raw material used was a mixture of starch, glycerol and water. Corn starch used had the water content on wet basis of 10.76%, particle sizes between 2.3 and 37.3  $\mu\text{m}$ , and a density of 0.561 g /  $\text{cm}^3$ ; glycerine had a concentration of 99.5% and a density of 1.262 g /  $\text{cm}^3$ . The water used was from the water supply system.. Starch was introduced into the extruder by means of the dispenser and the plasticizers with a peristaltic pump. In order to use a single metering pump, the two plasticizers, glycerol and water, being

## REZULTATE

Metoda matematică generală elaborată a fost aplicată la determinarea consumurilor energetice a procesului de fabricație a foliilor agricole biodegradabile utilizând instalația dezvoltată în acest sens de către INMA București, Sucursala Cluj-Napoca (fig.2). Pentru determinarea consumurilor energetice a procesului, se va aplica un model matematic simplificat luându-se în calcul doar cele două faze efective ale procesului de fabricație: extrudarea și respectiv laminarea.

Procesul de fabricație al foliilor agricole biodegradabile pentru care s-a aplicat metoda matematică dezvoltată s-a desfășurat în următoarele condiții: materia primă utilizată a fost un amestec de amidon, glicerina și apa. Amidonul de porumb utilizat a avut umiditatea raportată la substanța umeda de 10,76%, dimensiunile particulelor între 2,3 și 37,3  $\mu\text{m}$  și densitatea de 0,561 g/ $\text{cm}^3$ ; glicerina a avut o concentrație de 99,5 % și o densitate de 1,262 g/ $\text{cm}^3$ . Apa utilizată a fost apa de la rețea. Amidonul a fost introdus în extruder cu ajutorul dozatorului iar plastifiantii cu ajutorul pompei peristaltice. În scopul utilizării unei singure pompe dozatoare, cei doi plastifianți, glicerina și apa, fiind miscibili, au fost amestecați în proporția din rețetă și introduși în

miscible, were mixed in the proportions of the formulation and introduced into tank plasticizers. The feed rate with raw material was 12 kg / h. Temperatures in the five zones of the extruder were 30°C, 50°C, 100°C, 130°C, 150°C and the temperature in the mould was 150°C.

The main parts of the installation are: dispenser 1; extruder 2, widening matrix 3 and the rolling equipment 4.

Extrusion equipment used was a laboratory twin-screw extruder with co-rotating intermeshing screws, with a productivity of 12 kg/h, screw diameter  $D=25$  mm, screw length  $L=30xD$  and screw speed of 400 rpm. The extruder cylinder is modular and has five zones, each zone having independent heating and cooling. Each of the 5 zones, Z1-Z5, is equipped with one temperature sensor that measures temperature and controls starting or stopping of the heaters or fans to maintain the temperature set in each zone.

Dosage of powder materials in the extruder hopper was achieved using twin screw dispenser and dispensing components in the Z2 area will be done using metering pumps.

The results obtained by applying the mathematical method developed are presented in Table 1.

rezervorul pentru plastifianti. Debitul de alimentare cu materie primă 12 kh/h. Temperaturile în primele cinci zone ale extruderului au fost 30°C, 50°C, 100°C, 130°C, 150°C iar temperatura în zona matriței a fost de 150°C.

Elementele principale ale instalatie sunt: Dozatorul 1, Extruderul 2, Matrița de lățire 3 și Echipamentul de laminare 4.

Echipamentul de extrudare folosit a fost un extruder cu doi melci modulari corotativi, cu o productivitate de 12 kg/h, diametrul melcilor:  $D=25$  mm, lungimea melcilor:  $L=30xD$ , turația melcilor 400 rot/min. Cilindrul extruderului este modular și are cinci zone, fiecare zona având încălzire și răcire independentă. Fiecare dintre primele 5 zone, Z1-Z5, este prevăzută cu cate un senzor de temperatura care măsoară temperaturile și comandă pornirea sau oprirea încălzitoarelor sau ventilatoarelor pentru menținerea temperaturilor reglate pe fiecare zonă.

Dozarea materialelor pulverulente în pâlnia extruderului s-a realizat cu ajutorul dozatorului cu doi melci iar dozarea componentilor in zona Z2 se va face cu ajutorul unor pompe dozatoare.

Rezultatele obținute în urma aplicării metodei matematice dezvoltate sunt prezentate în tabelul 1.

Table 1  
Energy consumption divided on biodegradable agricultural film manufacturing phases / stages

Parameter	Notation U.M.	Value
Material flow	$D_m$ [kg/h]	12.00
Energy consumption of the dispenser	$E_{MPF.F2.1}$ [kwh/kg]	0.05
Total energy consumption of extruder	$E_{MPF.F2.2}$ [kwh/kg]	0.90
Energy consumption of extrusion screws	$E_{MPF.F2.2.1}$ [kwh/kg]	0.43
Energy consumption of heating system	$E_{MPF.F2.2.2}$ [kwh/kg]	0.37
Energy consumption of cooling system	$E_{MPF.F2.2.3}$ [kwh/kg]	0.10
Energy consumption of widening matrix	$E_{MPF.F2.3}$ [kWh/kg]	0.42
Total energy consumption of rolling equipment	$E_{MPF.F3}$ [kWh/kg]	1.20
Energy consumption for driving laminating rollers	$E_{MPF.F3.1}$ [kWh/kg]	0.03
Energy consumption for heating	$E_{MPF.F3.2}$ [kWh/kg]	0.50
Energy consumption for cooling	$E_{MPF.F3.3}$ [kWh/kg]	0.67
Total energy consumption for the process	$E_{MPF}$ [kWh/kg]	2.57

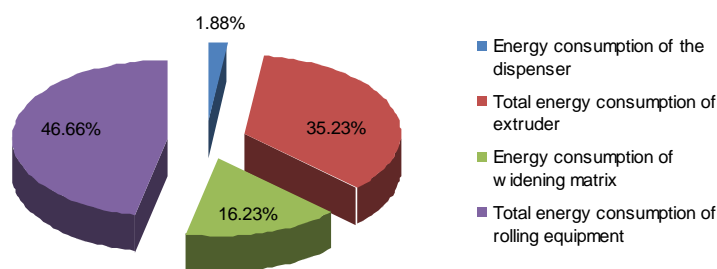


Fig. 3 – The structure of energy consumption divided into phases of the manufacturing process of biodegradable agricultural film

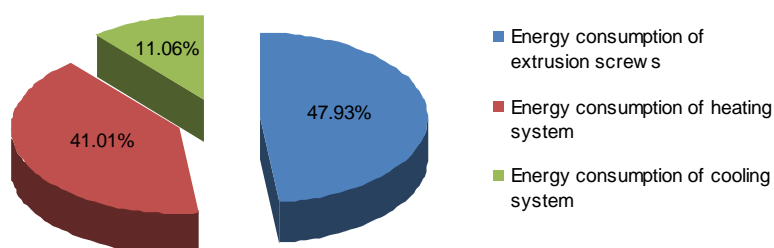


Fig. 4 – The structure of energy consumption divided into stages of extrusion phase of biodegradable agricultural film

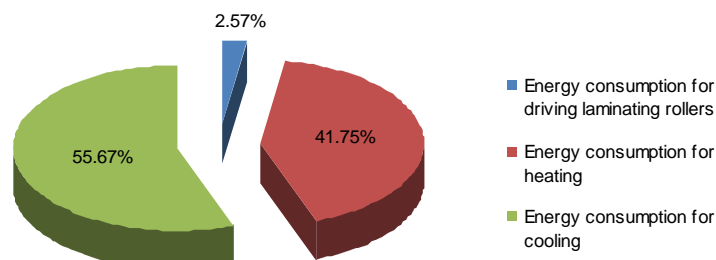


Fig. 5 – Energy consumption structure divided into stages of rolling phase of biodegradable agricultural film

The analysis of energy consumption (Fig. 3) shows a maximum power consumption (46.66%) during the rolling, followed by energy consumption in the extrusion phase (35.23%), the phase of widening (16, 23%) and the dispenser (1.88%).

In the extrusion phase of the material (Fig. 4) The maximum power consumption is determined by the operation of the extrusion screws, followed by the heating (41.01%) and the cooling (11.06%). The energy required to drive the extrusion screws is influenced primarily by the extrusion screws speed which depends on the physical characteristics of the material and structural transformations that occur in the five phases of extrusion phase. Also, the energy consumption for the heating or cooling systems, depends on the working temperature in the 5 zones of the extruder which are determined based on the thermo-physical characteristics (glass transition temperature and the melting temperature) of the processed mixtures.

Energy-intensive stage of rolling is due to the cooling equipment (consuming about 55.67% of this total energy consumed in this phase of the process (Fig. 5), followed by heating equipment (41.75%) and driving the laminating rollers (2.57%).

The analysis of energy consumption in the manufacturing process for the respective phases of biodegradable agricultural film allows to identify equipment with high energy consumption. Thus, we can achieve energy optimization of the manufacturing process so that the energy consumed in the process to be minimized, thus ensuring a positive effect on the environment and optimum use of resources.

## CONCLUSIONS

Determining the energy consumption of the manufacturing process for biodegradable films produced from renewable sources, for agriculture is important both in terms of environmental impact and in terms of the use of energy resources needed. Such general mathematical method developed in this paper allows the determination of both total energy consumption of the manufacturing process of biodegradable agricultural film using various raw materials and to identify the main energy consumers, thus enabling optimization of the process energetically. This involves beneficial effects on the environment by saving resources, and an economic efficiency of the process.

Applying mathematical method for energetic analysis of manufacturing process for biodegradable agricultural film from renewable materials, using innovative technology developed by INMA Bucharest, Branch of Cluj-Napoca allowed assessment in terms of energy of the technology, on the one hand and on the other hand

Analiza structurii consumurilor energetice (fig.3) arată un consum maxim de energie (46,66%) în faza de laminare a materialului, urmat de consumul energetic din faza de extrudare (35,23%), a fazei de lățire (16,23%) și respectiv al dozatorului (1,88%).

În faza de extrudare a materialului (fig.4) consumul energetic maxim se datorează acționării melcilor de extrudare, urmat de instalația de încălzire (41,01%) și respectiv instalația de răcire (11,06%). Energia necesară pentru acționarea melcilor de extrudare este influențată în primul rând de turația melcilor de extrudare care depinde de caracteristicile fizice ale materialului și transformările structurale care au loc pe parcursul celor 5 etape ale fazei de extrudare. De asemenea energia consumată de instalațiile de încălzire, respectiv răcire, este dependentă de temperatura de lucru pe cele 5 zone ale extruderului care se determină funcție de caracteristicile termofizice (temperatura de tranziție vitroasă și temperatura de topire) ale amestecurilor procesate.

Consumului energetic ridicat în etapa de laminare se datorează echipamentului de răcire (acesta consumând circa 55,67% din energia totală consumată în această fază a procesului (fig.5), urmată de echipamentul de încălzire (41,75%) și respectiv antrenarea valțurilor de laminare (2,57%).

Analiza structurii consumurilor energetice în fazele respectiv etapele procesului de fabricare a foliilor agricole biodegradabile permite identificarea echipamentelor cu consum energetic ridicat. Astfel putându-se realiza o optimizare energetică a procesului de fabricație astfel încât energia consumată în proces să fie cât mai redusă, asigurându-se astfel un efect pozitiv asupra mediului inconjurător și o utilizare optimă a resurselor.

## CONCLUZII

Determinarea consumurilor energetice a procesului de fabricație a foliilor biodegradabile obținute din surse regenerabile, pentru agricultură este importantă atât din punct de vedere a impactului asupra mediului cât și din punct de vedere a utilizării resurselor energetice necesare. Astfel metoda matematică generală dezvoltată în cadrul lucrării permite atât determinarea consumului energetic total al procesului de fabricație a foliilor agricole biodegradabile utilizând diverse materii prime, cât și identificarea principalilor consumatori energetici, permițând astfel optimizarea procesului din punct de vedere energetic. Aceasta implicând efecte benefice atât asupra mediului inconjurător prin economie de resurse, cât și o eficientizare economică a procesului.

Aplicarea metodei matematice în vederea analizei energetice a procesului de fabricare a foliilor agricole biodegradabile din surse regenerabile utilizând tehnologia inovativă dezvoltată de INMA București, Sucursala Cluj-Napoca a permis evaluarea din punct de vedere energetic al tehnologiei pe de o parte iar pe de altă parte

the identification of rolling phase as the main consumer of energy (46,66%), followed by energy consumption in the extrusion phase (35,23%), the phase of widening (16,23%) and the dispenser (1,88%).

Further development of the mathematical method proposed according to the specific manufacturing technology used will also allow the study of the influence of the mixtures physical-thermal characteristics from renewable material used as raw materials on the energy consumption of the phases or stages of the manufacturing process.

#### Acknowledgement

The results presented in this article were obtained under the project: New products, biodegradable, agriculture, renewable resources, Program „NUCLEU”: Development System research, mechanization technologies, computerization, automation, management and technical equipment competitive for agriculture and food industry / Stimme, Contract number: 15 N / 27.02.2009 / Act ad.nr.1 / 2015.

#### REFERENCES

- [1]. Briassoulis D., (2006) - *Mechanical performance and design criteria of biodegradable low-tunnel films*, Journal of Polymers and the Environment, vol.14, issue 2, ISSN 1566-2543, pg.289–307;
- [2]. Briassoulis D., (2004) - *An Overview on the Mechanical Behavior of Biodegradable Agricultural Films*, Journal of Polymers and the Environment, vol.12, issue 2, ISSN 1566-2543, pg.65-81;
- [3]. Briassoulis D., (2007) – *Analysis of the mechanical and degradation performances of optimized agricultural biodegradable films*, Journal of Polymer Degradation and Stability, vol.92, issue 6, pg.1115–1132;
- [4]. Castillo L., López O., López C., Zaritzkyb N., García M., Barbosaa S., Villara M., (2013) - *Thermoplastic starch films reinforced with talc nanoparticles*, Carbohydrate Polymers, vol.95, issue 2, ISSN 0144-8617, pg.664– 674;
- [5]. Grigat, E., Koch, R., Timmermann, R. (1998) - *BAR 1095 and BAK 2195: completely biodegradable synthetic thermoplastics*, Biodegradable Polymers and Macromolecules, vol. 59, issue 1–3, pg. 223–226;
- [6]. Kapanen, A., Schettini, E., Vox, G., et al. (2008) - *Performance and Environmental Impact of Biodegradable Films in Agriculture: A Field Study on Protected Cultivation*, Journal of Polymers and the Environment, vol. 16, issue 2, pp 109-122;
- [7]. Kasirajan, S., Agron, M. N., (2012) - *Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review*, Agronomy for Sustainable Development, vol. 32, issue 2, ISSN: 1774-0746, pg.501–529;
- [8]. Kyrikou I., Briassoulis D. (2007) - *Biodegradation of Agricultural Plastic Films: A Critical Review*, Journal of Polymers and the Environment, vol. 15, issue 2, ISSN: 1566-2543, pg.125–150;
- [9]. López, O. V., Zaritzky, N. E., Grossmann, M., García, V.E. (2013) - *Acetylated and native corn starch blend films produced by blown extrusion*, Journal of Food Engineering, vol.116, issue 2, ISSN: 0260-8774, pg.286–297;
- [10]. Rosentrater K. A., Otieno A. W., (2006) - *Considerations for manufacturing bio-based plastic products*, Journal of Polymers and the Environment, vol.14, issue 4, ISSN 1566-2543, pg.335–346.

a identificarea fazei de laminare ca fiind principalul consumator de energie (46,66%), urmat de consumul energetic din faza de extrudare (35,23%), a fazei de lăţire (16,23%) și respectiv al dozatorului (1,88%).

Dezvoltarea în continuare a metodei matematice propuse în concordanță cu specificul tehnologiilor de fabricație utilizate va permite de asemenea și studiul influenței caracteristicilor fizico-termice ale amestecurilor din surse regenerabile utilizate ca materie primă asupra consumurilor energetice ale fazelor respectiv etapelor procesului de fabricație.

#### Mulțumiri/Recunoștință

Rezultatele prezentate în acest articol au fost obținute în cadrul proiectului : Produse noi, biodegradabile, pentru agricultura, din resurse regenerabile, Program NUCLEU: Dezvoltarea cercetarilor privind sistemele, tehnologiile de mecanizare, informatizare, automatizare, management și echipamente tehnice competitive pentru agricultura și industrie alimentara / STIMM, Numar contract: 15 N / 27.02.2009 / Act ad.nr.1/2015.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1]. Briassoulis D. (2006) – *Performante mecanice si criterii de proiectare a foliilor biodegradabile pentru tunele joase*, Revista polimerilor si mediului, vol.14, nr.2, ISSN 1566-2543, pag.289–307;
- [2]. Briassoulis D., (2004) – *O vedere de ansamblu asupra comportamentului mecanic al foliilor agricole biodegradabile*, Revista polimerilor si mediului, vol.12, nr. 2, ISSN 1566-2543, pag.65-81;
- [3]. Briassoulis D., (2007) – *Analiza performantelor mecanice si de degradare a foliei agricole biodegradabile optimizate*, Revista Degradarea si Stabilitatea Polimerilor, vol.92, nr. 6, pag.1115–1132;
- [4]. Castillo L., López O., López C., Zaritzkyb N., García M., Barbosaa S., Villara M., (2013) - *Folia din amidon termoplastic întărită cu nanoparticule de talc*, Polimeri Carbohidrați, vol. 95, nr.2, ISSN 0144-8617, pg.664– 674;
- [5]. Grigat, E., Koch, R., Timmermann, R. (1998) – *Termoplasticele sintetice complet biodegradabile: BAR 1095 si BAK 2195.*, Polimeri biodegradabili și Macromoleculă, vol. 59, nr. 1–3, pag. 223–226;
- [6]. Kapanen, A., Schettini, E., Vox, G., et al. (2008) – *Performanta si impactul asupra mediului a foliei biodegradabile in agricultura: Un studiu asupra cultivarii protejate*, Revista polimerilor si mediului, vol. 16, nr.2, pag 109-122;
- [7]. Kasirajan, S., Agron, M. N., (2012) – *Polietilena si mulci biodegradabili pentru aplicatiile agricole*, Agronomia pentru dezvoltare sustenabilă, vol. 32, nr.2, ISSN: 1774-0746, pag.501–529;
- [8]. Kyrikou I., Briassoulis D. (2007) – *Biodegradarea foliilor agricole din plastic: o recenzie critica*, Revista polimerilor si mediului, vol. 15, nr.2, ISSN: 1566-2543, pag.125–150;
- [9]. López, O. V., Zaritzky, N. E., Grossmann, M., García, V.E. (2013) – *Folii acetilate si din amestec de amidon de porumb produse de extruziunea prin suflare*, Revista de Inginerie Alimentară, vol. 116, nr.2, ISSN: 0260-8774, pag.286–297;
- [10]. Rosentrater K. A., Otieno A. W. (2006) - *Consideratii pentru realizarea produsele bio-plastice*, Revista polimerilor si mediului, vol. 14, nr.4, ISSN 1566-2543, pag.335–346.