研 究 報 文

クラフトパルプ化での蒸解条件がアカシア・アウリカリフォルミスの
パルプ特性に及ぼす影響BCSIR 研究機構 パルプ・製紙研究部門 M. サーワール ジャハン
デッカ大学 応用化学・化学技術学科 R. サビーナ, A. ルバヤットInfluence of Cooking Conditions on Pulp Properties
of *Acacia auriculiformis* in Kraft Pulping

M. Sarwar Jahan

Pulp and Paper Research Division, BCSIR Laboratories

R. Sabina and A. Rubaiyat

Department of Applied Chemistry and
Chemical Technology, Dhaka University

M. ジャハン

R. サビーナ

A. ルバヤット

Acacia auriculiformis was subjected to kraft pulping by varying operational variables, such as time, temperature, and active alkali charge. A central composite design was used to investigate the influence of operational conditions on the pulp properties (total pulp yield, screened pulp yield, kappa number, tensile index, burst index and tear index). A second order polynomial model consisting of three independent variables was found to accurately describe the kraft pulping of *Acacia auriculiformis*. The minimum R^2 value was above 0.94, which supported well fitting in the proposed equation. The values of screened pulp yield, total pulp yield, kappa number, tensile index, burst index and tear index at the central point of operational variables were 43.5%, 44.6%, 26.1, 41.7 N.m/g, 3.3 kPa.m²/g and 12.3 mN.m²/g, respectively, which are within the vicinity of predicted value.

Keywords : *Acacia auriculiformis* pulping, Central composite design, Dependent and independent variables, Multiple non-linear regression, Pulp properties

分類 : F₁ KP 製造一般 (アルカリパルプ含む), F₂ KP 蒸解

1. Introduction

The last few decades have seen a growing increase in the production and consumption of paper and board throughout the world. Based on the data from FAO (2003), world figures for paper and board increased at a rate of 4.12% each year from 160 million ton in 1978 to 324 million ton in 2002. In recent years, Southeast Asian countries, such as Indonesia, Malaysia, Philippines and Thailand have been experiencing a phenomenal growth in production and consumption of paper products. The demand for the paper and paperboard as well as other solid-wood prod-

ucts and fuel wood will continue to develop because of combined consequences of ever increasing population, literacy rates, and quality of life. Population density of our country is very high. Therefore, forestland for industry is decreasing in competing with other land uses. So, it is hard to supply pulpwood from our forest to keep the growth of paper industry. Also environmentalists are keeping pressure to the industry for preserving forest. To achieve this, plantation of fast growing species must be established to compensate the dwindling supply from natural forest. Fast wood plantation can produce one and a half to two times more wood per hectare per year, and reach maturity two

to three times faster than longer-rotation softwood plantations (Cossalter and Smith 2003). Higher the yield lowers the cost of raw material, less land is needed to produce the same amount of wood, and this helps to reduce the costs of land purchase, production and transport. So we can say that restricted access to the natural forest attracts short rotation wood as sources of fibers. *Acacia* species have been studied and used for pulpwood in many countries like Australia, Brazil, South Africa, Indonesia, Vietnam and Malaysia (Logan and Balodis 1982). *Acacia auriculiformis* is the best species in the environment of Bangladesh (Anon 2007). It occurs from near sea level to 400 m, but is most common at elevation less than 80 m. It is predominantly found in the seasonally dry tropical lowlands in the humid and subhumid zones. The mean annual rainfall in its natural range varies from 700–2000 mm, and the dry season (i.e. monthly rainfall less than 40 mm) may be 7 months. The mean maximum temperature of the hottest month is 32–34°C and the mean minimum of the coolest month is 17–22°C (World Agroforestry Centre 2005). *Acacia auriculiformis* is an evergreen tree that grows between to 15–30 m tall, with a trunk up to 12 m long and 50 cm in diameter.

The primary purpose of this work was to optimize the cooking conditions of kraft pulping of *acacia aulicuriformis* by establishing a variation range of active alkali, cooking time and temperature using a central composite design.

2. Experimental

1) Material

The *A. auriculiformis* used in this study were collected from the Gazipur Forest Station at the age of 10 years old. Three trees were selected for this experiment. 2 ft from top and bottom and branches of these trees was discarded and remaining portion was debarked and chipped to 0.5 × 0.5 × 2 cm size.

2) Pulping

Pulping was carried out in a 5 l capacity batch cylindrical digester heated by means of electrical resistance and a motor rotated the digester. In a typical experiment, 300 g of o.d. *A. auriculiformis* was weighed and charged into the digester. The liquor to wood ratio was 4 : 1 (dry wt).

After digestion the pulp was washed till free from residual chemicals and screened by flat vibratory screener (Yasuda, Japan). The screened pulp yield, total pulp yield and screened reject were determined gravimetrically as percentage of o.d. raw material. The kappa number (T 236 om-99) of the resulting pulp was determined in accordance with Tappi Test Methods.

3) Evaluation of pulps

Pulps were beaten in PFI mill by 3,000 revolution and freeness (°SR) was measured. The hand sheets of about

60 g/m² were made in a Rapid Kothén Sheet Making Machine according to German Standard Methods (No.106). The sheets were tested for tensile (T 494 om-96), burst (T 403 om-97), tear strength (T 414 om-98) and folding endurance (T 511 om 96) according to TAPPI Standard Test Methods.

4) Experimental design

A central composite design was used to relate the dependent and independent variables. The model used a series of points (experiments) around central one and several additional points to estimate the first- and second-order interaction term of a polynomial (shown in Eq 1).

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_{0i} X_{ni} + \sum_{i=1}^3 a_{2i} X_{ni}^2 + \sum_{i=1, j=1}^3 a_{3ij} X_{ni} X_{nj} \dots\dots(1)$$

This design meets the general requirement that each parameter in the mathematical model can be estimated from a fairly small number of experiments (Montgomery 1991). The total number of experiment 'N' required for the three dependent variables *k* (viz temperature, T; time, *t*; and active alkali concentration, AA) was calculated from the following formula (Aknazarova and Kafarov 1982):

$$N = 2^k + 2 * k + 1 \dots\dots(2)$$

And was found to be 15

Independent variables were normalized by using the following equation:

$$X_n = \frac{X - \bar{X}}{(X_{\max} - X_{\min})/2} \dots\dots(3)$$

Where *X* is the absolute value of the independent variable concerned, $\bar{X}$ is the average value, and *X*_{max} and *X*_{min} are its maximum and minimum value, respectively.

3. Results and Discussion

Table 1 shows the value of independent variables and the properties of the pulp and paper sheets provided by the three cooking processes as determined using the proposed experimental design. Each result was the average for three (pulp properties) and ten samples (paper properties). Deviation from the respective means was all less than 5%. The equations 4–9 were obtained by linear regression analysis and the results confirmed the adequacy of the fitted models, where all models are significant at a level of 0.005 or less with satisfactory values of R².

The dependent variable *Y* represents the screened pulp yield (SPY), total pulp yield (TPY), Kappa number (KN), tensile index (TeI), burst index (BI) and tear index (TI). The independent variables denote the active alkali charge (*X*_A), cooking time (*X*_t) and temperature (*X*_T). The independent variables were normalized from –1 to +1 by using Eq. 3 to facilitate direct comparisons of coefficient and to better understand the effects of individual variables on the dependent variable. Normalization of the independent variables also provides better estimates for the regres-

Table 1 Normalized and absolute values of the independent variables used in the experimental design

Experiment	X _A	X _T	X _I	AA, %	Temperature	Time, min.
1	0	0	0	16	170	120
2	0	-1	0	16	160	120
3	0	1	0	16	180	120
4	0	0	1	16	170	150
5	0	0	-1	16	170	90
6	-1	-1	-1	14	160	90
7	-1	-1	1	14	160	150
8	1	1	-1	18	180	90
9	1	1	1	18	180	150
10	-1	1	1	14	180	150
11	-1	1	-1	14	180	90
12	1	-1	-1	18	160	90
13	1	-1	1	18	160	150
14	1	0	0	18	170	120
15	-1	0	0	14	170	120

Table 2 Experimental values of the dependent variables used in the experimental design

Experiment	SY, %	R, %	TPY, %	KN	Ten. I	BI	TI	DFN	D
1	43.5	1.1	44.6	26.1	41.7	3.3	12.3	80	0.500
2	47.0	3.1	50.1	33.6	42.0	3.4	13.8	85	0.502
3	42.0	0.6	42.6	25.0	42.2	3.5	12.3	91	0.521
4	42.9	0.3	43.2	21.1	42.3	3.5	11.4	90	0.498
5	42.7	3.5	46.2	25.6	41.6	3.3	11.8	81	0.474
6	42.8	9.8	52.6	46.4	40.0	3.3	13.5	79	0.461
7	43.1	7.1	50.2	40.4	42.3	3.5	13.1	90	0.504
8	42.0	0.2	42.2	21.8	43.4	3.6	10.6	95	0.536
9	39.7	0	39.7	18.8	42.5	3.4	10.0	82	0.493
10	40.0	0.4	40.4	33.4	38.9	2.9	11.3	85	0.514
11	41.5	4.1	45.6	35.6	38.9	2.8	10.4	75	0.476
12	44.0	6.4	50.4	32.1	39.6	3.0	11.5	81	0.497
13	44.5	3.0	47.5	25.3	41.1	3.3	9.9	85	0.519
14	42.8	0.1	42.9	24.1	40.9	3.2	10.4	81	0.512
15	41.7	3.6	45.3	38.6	39.3	3.1	12.1	85	0.532

sion coefficient by reducing correlations between linear and quadratic interaction term (Montgomery 1991).

The central combination is that for which all normalized independent variables are zero. Coefficients a_0 , a_1 , $a_2 \cdots a_n$ are unknown regression coefficient that must be estimated from experimental data. The multiple linear regression analysis was performed on all terms of Eq. 1. (by using the data in Table 2), those terms with Snedecor's F values below 4.5 were discarded by using the stepwise method.

The equations derived for the different dependent variables were as follows :

$$\text{SPY} = 43.624 + 0.39 X_A - 1.62 X_T - 0.28 X_I - 1.406 X_A^2 + 0.844 X_T^2 - 0.856 X_I^2 - 0.3 X_A X_T - 0.075 X_A X_I - 0.575 X_T X_I \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\text{TPY} = 44.556 - 1.14 X_A - 4.03 X_T - 1.6 X_I - 0.444 X_A^2 + 1.806 X_T^2 - 0.156 X_I^2 - 0.1 X_A X_T + 0.275 X_A X_I - 0.3 X_T X_I \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\text{KN} = 26.127 - 7.23 X_A - 4.32 X_T - 2.25 X_I + 5.217 X_A^2 + 3.167 X_T^2 - 2.783 X_I^2 + 0.125 X_A X_T - 0.2 X_A X_I + 0.95 X_T X_I \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\text{TeI} = 41.669 + 0.81 X_A + 0.09 X_T + 0.36 X_I - 1.561 X_A^2 + 0.439 X_T^2 + 0.289 X_I^2 + 1.212 X_A X_T - 0.212 X_A X_I - 0.587 X_T X_I \quad \cdots \cdots (7)$$

Table 3 Snedecor's F , multiple- R , R^2 and adjusted R^2 values for Eqs. 4–9

Equation	F	Multiple- R	R^2	Adj- R^2
Total Pulp yield (5)	78.02	0.996	0.993	0.980
Screened pulp yield (4)	9.19	0.971	0.943	0.840
Kappa number (6)	166,561	1.000	1.000	1.000
Tensile index (7)	4,822	1.000	1.000	1.000
Burst index (8)	15.09	0.945	0.893	0.834
Tear index (9)	593.9	1.000	0.999	0.997

$$BI = 3.4 + 0.9 X_a + 0.06 X_t - 0.19 X_a^2 + 0.225 X_a X_T - 0.075 X_t X_T \quad \dots\dots(8)$$

$$TI = 12.304 - 0.8 X_a - 0.72 X_T - 0.21 X_t - 1.0561 X_a^2 + 0.744 X_T^2 - 0.706 X_t^2 + 0.512 X_a X_T - 0.337 X_a X_t + 0.288 X_T X_t \quad \dots\dots(9)$$

Snedecor's F , multiple- R , R^2 and adjusted R^2 values for the fitting of Eqs 4–9 are listed in Table 3.

Coefficients a_0 represent the estimated response values for the central combination of operating conditions. These all dependent variables were found to be satisfactorily fitted by 9 variables except burst index, which was fitted by 5 variables.

1) Rejects

Rejects of pulp may indicate the uniformity of raw material or the efficiency of chemical treatment. Table 2 shows that the quantity of rejects ranged from 0 to about 9.8%. Since the rejected fibers did not constitute part of the pulps evaluated, the rejects content will not be subjected to statistical analyses.

There were significant interactions between alkali–time, alkali–temperature and time–temperature for screened pulp yield, total pulp yield, kappa number, tensile index and tear index. On the other hand, only alkali–temperature and time–temperature were correlated for burst index.

2) Screened pulp yield

Fig. 1–Fig. 3 show the variation of screened pulp yield as a function of the normalized values of two independent variables. The screened pulp yield was the highest at central point of alkali and lower point of temperature. The experimental screened pulp yield at the central points of three independent variables was 43.6% while the predicted value was 43.5%. Longer time and higher temperature decreased screened pulp yield as observed from Eq. 4 and Fig. 1–Fig 3. The screened pulp yield was lowest when alkali charge, time and temperature was highest.

3) Total pulp yield

Total pulp yield was decreased with increasing three independent variables. Increased cooking time, higher temperature and active alkali charge gave the lowest total pulp yield (39.7%) as observed from Eq. 5, and Fig. 4–Fig. 6. The experimental and predicted value of total pulp

Fig. 1 Variation of screened pulp yield with cooking active alkali and temp **Fig. 2** Variation of screened pulp yield with active alkali and time

yield was same at the central point of independent variables. In this investigation, pulp yield in *A. auriculiformis* was lower than *A. nilotica* (Kharistova and Karar 1999). Pulp yield in *A. mangium* was quite higher than the present investigation of *A. auriculiformis* (Miyanishi and Watanabe

Fig. 3 Variation in screened pulp yield with cooking time and temp

Fig. 6 Variation of total pulp yield with cooking time and temperature

Fig. 4 Variation of total pulp yield with active alkali and temperature

Fig. 7 Variation of kappa number with active alkali and temp

Fig. 5 Variation of total pulp yield with active alkali and time

Fig. 8 Variation of kappa number with active alkali and time

Fig. 9 Variation of kappa number with cooking time and temperature

Fig. 11 Variation of burst index with active alkali and cooking time

Fig. 10 Variation of tensile index with active alkali and cooking time

Fig. 12 Variation of tensile index with cooking time and temp

2004). This may be attributed by difference of location of raw material and also the age of tree.

4) Kappa number

Based on Eq 6 and Fig. 7–Fig. 9, one should use a higher active alkali charge, longer time and higher temperature for lower kappa number. Variation in kappa number is more sensitive to alkali concentration (14.5) than in the temperature (8.6), with cooking time the variation is in an intermediate situation (4.5). The experimental and predicted kappa number was 26.1 and 26.0, respectively, at the central point of independent variables.

5) Tensile index and burst index

Regarding tensile index and burst index, if a lower value is obtained, then a higher alkali charge and a longer cooking time should be used. Higher tensile index will be obtained if central point of active alkali charge is used (Fig. 10 and Fig. 11). The effects of time and temperature

on tensile and burst index were less than active alkali charge (Fig. 12 and Fig. 13). The same tensile index was observed in experimental and predicted value at the central point.

6) Tear index

Tear index was decreased with increasing active alkali charge, cooking time and temperature as observed from Eq. 9. Variation in tear index with alkali was $2.3 \text{ mN.m}^2/\text{g}$, while it was $0.4 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ for time and $1.5 \text{ mN.m}^2/\text{g}$ for temperature variation. Tear index was 100% fitted in the proposed Eq. 9.

The density value of *A. auriculiformis* was 0.461–0.519 g/cc under the cooking condition employed. The results of double fold number and density of kraft pulp obtained from acacia auriculiformis were not correlated well with the Eq. 1. So we did not proceed further.

Fig. 13 Variation of burst index with cooking time and temp

4. Conclusions

Acacia auriculiformis is an effective alternative to traditional tropical hardwood in Bangladesh. Pulp properties were well fitted with independent variable in second order polynomial equation. The screened pulp yield with acceptable kappa number was obtained at the central points of independent variables. The total pulp yield and kappa

number were decreased with the increase of alkali charge, cooking time and temperature. Considering all dependent variables, central points of normalized value showed the best results.

References

- 1) Aknazarova S. and Kafarov V. : 1982, Experiment optimization in Chemistry and Chemical Engineering, Mir Publisher, Moscow
- 2) FAO : 2003, Production Annuary, Rome
- 3) Montgomery D. C. and Diseno Y. : 1991, analisis de experimentos, Grupo Editorial Iberoamericano
- 4) Cossalter C. and Smith P. C. : 2003, Fast-Wood Forestry Myths and Realities, CIFOR, Jakarta, Indonesia, p 50
- 5) Khristova P. and Karar I. : 1999, Soda-anthraquinone pulp from three *Acacia nilotica* subspecies, Biore-source Technology 68, 209-213
- 6) Logan, A. F. and Balodis V. : 1982, The Malaysian Forester 42(2) 217-236
- 7) Miyanishi T. and Watanabe K. : Kraft pulping of *Acacia mangium*, 2004 Tappi Pulping, Engineering and Environment Conference Proceedings (CD version)
- 8) World Agroforestry Centre : 2005, Tree databases, Agroforestry Database 3.0 (CD-version)

以下の翻訳は、紙パ技協誌読者の便宜のために、著者の了解のもとに紙パルプ技術協会が翻訳したものである。翻訳の文章は紙パルプ技術協会のものであるが、その内容に関してはあくまでオリジナルが正であり、翻訳に基づく内容に関する議論またはそれに基づく結果に紙パルプ技術協会が責任を持つものではない。

1. 緒 言

ここ 20 年の間に、世界での紙・板紙の生産量と消費量は増大してきた。FAO (2003) のデーターによれば、世界の紙・板紙の値は、1978 年 (160 百万トン) から 2002 年 (324 百万トン) までに、毎年 4.12% の率で上昇している。最近、インドネシア、マレーシア、フィリッピンおよびタイのような東南アジアの国々では、紙製品の生産と消費の点で、驚くべき成長を経験してきている。木材製品、燃料用木材と同様に、紙・板紙に対する需要は、今後も続くものと考えられ、これは人口の依然とした増加、読み書き能力のアップ、および生活の質の向上の結果によるものである。我々の国の人口密度は非常に高い。したがって、産業のための森林地は、他の目的への利用との競争のために減少している。そのため、国の森林から製紙産業の発展を維持するためのチップ材を十分に供給することは困難である。また、環境保護者は、森林の保護のために、産業界に圧力をかけ続けている。これを達成するには、早成樹の植林を、天然林からの供給がだんだん少なくなることを補

填するために、確立しなければならない。早成樹の植林は、一年一ヘクタール当たり 1.5 から 2 倍木材を生産でき、長期ローテーションの針葉樹植林よりも 2 から 3 倍早く成熟する (Cossalter と Smith 2003)。収率が高ければ原材料のコストは安くなり、同じ量の木材を生産するのであれば面積は少なく済むので、これは土地の購入、生産および運送などのコスト削減につながる。したがって、天然林への接近が制限されると、早成樹が繊維原料として魅力が出てくると言える。アカシア類はオーストラリア、ブラジル、南アフリカ、インドネシア、ベトナムおよびマレーシアのような国々で、パルプ材へ利用され、また研究されてきた (Logan と Balodis 1982)。アカシア・アウリカリフォルミスは、バングラデシの環境では最良の種である (Anon 2007)。これは海拔 0 レベルから 400 m までの範囲で見られるが、最も一般的なのは 80 m 以下である。それは、湿潤あるいは半湿潤の季節的には乾燥熱帯低地で比較的多く見られる。平均の降雨量は 700-2000 mm と幅があり、乾季 (月の降雨量が 400 mm 以下) は 7 ヶ月である。最も暑い月の平均最高気温は 32-34℃ で、最も寒い月の平均最低

気温は 17–22°C である (World Agroforestry Centre 2005)。アカシア・アウリカリフォルミスは常緑樹で、15–30 m の高さ、幹が 12 m、直径が 50 cm 位まで成長する。

この研究の主な目的は、アカシア・アウリカリフォルミスをクラフト蒸解する際に、セントラルコンポジット法を用いて、アルカリ添加率、蒸解時間と温度などの変数の範囲を規定し、蒸解条件を最適化することである。

2. 実験

1) サンプル

この研究で用いたアカシア・アウリカリフォルミスは Grazipur 林地から 10 年生のものを集めた。この試験では 3 本の本を用いた。これらの木の上部と下部から 2 m の部分と枝を除き、その残りの部分から皮を剥ぎ、0.5 × 0.5 × 2 cm のサイズにチップ化した。

2) 蒸解

蒸解は 5 L 容のバッチ式のシリンダー型の電気ヒーター付で、モータードライブの蒸解釜を用いて行った。一般的な方法は、300 g のチップを計量し、釜に装填する。液比は 4 : 1 である。

蒸解後パルプは残留薬品がなくなるまで洗浄し、フラットバイプレションスクリーン (Yasuda 日本) で精選した。精選収率、全収率と粕率は重量法で測定し、絶乾チップに対する % で表した。精選パルプのカッパー価は Tappi 標準テスト法 (T 236 om-99) に基づいて行った。

3) パルプの評価

パルプは PFI ミルで 3000 回転まで叩解し、フリーネス (°SR) を測定した。60 g/m² の手抄シートを、ドイツ標準法 (No.106) に従って、Rapid Kothen シート製造抄紙機で作製した。シートの裂断長 (T 494 om-96)、比破裂強度 (T 403 om-97)、比引裂強度 (T 414 om-98) および耐折強度 (T 511 om-96) は、Tappi 標準テスト法に基づいて行った。

4) 実験計画法

独立変数と従属変数とを関係づけるため、セントラルコンポジット法を用いた。モデルは、中央点近傍の点と 5, 6 点の追加点からなる一連の点 (実験値) を、多項式 (式(1)) の一次および二次の相互作用を推定するために用いた。

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_{ni} + \sum_{i=1}^3 a_2 X_{ni}^2 + \sum_{i=1, j=1}^3 a_3 X_{ni} X_{nj} \quad \dots\dots(1)$$

この実験計画法は、数学的なモデルでの各々のパラメーターを、かなり少ない実験から推定できると言う一般的な要求に合致している (Montgomery 1991)。三つの独立変数 k (すなわち 温度, T ; 時間, t ; そして活性アルカリ添加率, AA) から求められる全実験数 N は、次の式から得られる (Aknazarova と Kafarov 1982)。

$$N = 2^k + 2 * k + 1 \quad \dots\dots(2)$$

この式から 15 であることが判る。独立変数は次の式を用いて規準化される。

$$X_n = \frac{X - \bar{X}}{(X_{\max} - X_{\min}) / 2} \quad \dots\dots(3)$$

ここで X は注目する独立変数の絶対値であり、 $\bar{X}$ は平

均値であり、 $X_{\max}$ と $X_{\min}$ はそれぞれ最大値と最小値を示す。

3. 結果と考察

表 1 は、独立変数の値と提案した実験計画法によって決まった三つの蒸解プロセスによって得られたパルプおよびシートの特性とを示す。各々の結果は、パルプの特性は三つの、紙の特性は十のサンプルの平均値である。各々の平均値からの偏差は 5 % 以下である。

線形回帰分析によって、式(4)から(9)が得られた。そして、その結果は適応したモデルが妥当であることを確信させた。と言うのは、全てのモデルが、 R^2 の満足できる値を持つ 0.005 以下のレベルで有意であるからである。

従属変数の Y は精選収率 (SPY)、全収率 (TPY)、カップー価 (KN)、裂断長 (Tel)、比破裂強度 (BI) および比引裂強度 (TI) を代表している。独立変数は、活性アルカリ添加率 (X_a)、蒸解時間 (X_t) そして温度 (X_T) を示している。独立変数は式(3)を用いて -1 から +1 まで規準化されており、これにより係数を直接比較でき、また、独立変数への各々の値への効果をよく理解できる。独立変数の規準化はまた、線形と二次の相互作用を減ずることで、回帰係数をより良く見積もることができる。セントラルコンピナーションは、全ての規準化された独立変数の値をゼロになるようにするためである。係数 $a_0, a_1, a_2 \dots a_n$ は、実験データから推定されるべき未知の回帰係数である。多重線形回帰分析は、式(1) (表 2 のデータを用いて) の全ての項でなされ、それらの項で Snedecor の F 値が 4.5 以下のものは、逐次法を使って却下される。

異なった従属変数について導かれる式は、次のとおり :

$$\begin{aligned} \text{SPY} = & 43.624 + 0.39 X_a - 1.62 X_T - 0.28 X_t - 1.406 X_a^2 + \\ & 0.844 X_T^2 - 0.856 X_t^2 - 0.3 X_a X_T - 0.075 X_a X_t - 0.575 X_T X_t \end{aligned} \quad \dots\dots(4)$$

$$\begin{aligned} \text{TPY} = & 44.556 - 1.14 X_a - 4.03 X_T - 1.6 X_t - 0.444 X_a^2 + \\ & 1.806 X_T^2 - 0.156 X_t^2 - 0.1 X_a X_T + 0.275 X_a X_t - 0.3 X_T X_t \end{aligned} \quad \dots\dots(5)$$

$$\begin{aligned} \text{KN} = & 26.127 - 7.23 X_a - 4.32 X_T - 2.25 X_t + 5.217 X_a^2 + \\ & 3.167 X_T^2 - 2.783 X_t^2 + 0.125 X_a X_T - 0.2 X_a X_t + 0.95 X_T X_t \end{aligned} \quad \dots\dots(6)$$

$$\begin{aligned} \text{Tel} = & 41.669 + 0.81 X_a + 0.09 X_T + 0.36 X_t - 1.561 X_a^2 + \\ & 0.439 X_T^2 + 0.289 X_t^2 + 1.212 X_a X_T - 0.212 X_a X_t - 0.587 X_T X_t \end{aligned} \quad \dots\dots(7)$$

$$\begin{aligned} \text{BI} = & 3.4 + 0.9 X_a + 0.06 X_t - 0.19 X_a^2 + 0.225 X_a X_T - \\ & 0.075 X_t X_T \end{aligned} \quad \dots\dots(8)$$

$$\begin{aligned} \text{TI} = & 12.304 - 0.8 X_a - 0.72 X_T - 0.21 X_t - 1.0561 X_a^2 + \\ & 0.744 X_T^2 - 0.706 X_t^2 + 0.512 X_a X_T - 0.337 X_a X_t + 0.288 X_T X_t \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

式(4)から(9)に適合する Snedecor の F 、重相関 R, R^2 (重決定) および補正 R^2 値を、表 3 に示す。係数 a_0 は操業条件のセントラルコンピナーションのために見積もられた応答値を代表している。これら全ての従属変数は、比破裂強度の 5 変数のみに適合しているのを除いて、9 変数にうまく適合していることが分る。

1) 粕 率

パルプの粕は、原料の不均一性あるいは化学処理の効率を示しているものと思われる。表2は粕率が0から9.8%の範囲にあることを示している。粕の繊維は、評価されるパルプの一部にはならないので、粕率は統計処理の範囲外とした。

精選収率、全収率、カップー価および比引裂強度に関しては、アルカリ添加率-温度、アルカリ添加率-温度および時間-温度の間に有意な相互作用が認められる。一方、比破裂強度に関しては、アルカリ添加率-温度および時間-温度にしか関係しない。

2) 精選パルプ収率

図1-図3は、二つの規格した独立変数に対する精選収率の変化を示したものである。精選収率はアルカリ添加率の中央点で、温度は低い側で最高になる。三つの独立変数の中央点での実験から求まる精選収率は43.6%であり、予測値は43.5%であった。時間が長く、温度が高いほど、式(4)および図1-図3で見られるように、精選収率は低下する。アルカリ添加率、時間、および温度が最高なときに、精選収率は最低になる。

3) 全 収 率

全収率は三つの独立変数の値が増えるほど減少する。時間が長くなり、温度が高くなり、活性アルカリ添加率が増えるほど、式(5)および図4-図6で見られるように、全収率は最も低くなる(39.7%)。全収率の実験値および予測値は、独立変数の中央点で同じであった。今回の検討では、アカシア・アウリカリフォルミスのパルプ収率はアカシア・ニロティカ(*A. nilotica*) (Kharistova and Karar 1999)よりも収率が低い。アカシア・マンガム(*A. Mangium*) (Miyanishi and Watanabe 2004)は、今回評価したアカシア・アウリカリフォルミスの収率よりかなり高い。これは原材料の場所が違う点と樹齢によるものと思われる。

4) カップー価

式(6)と図7-図9から、活性アルカリ添加率が増やし、時間が長くなり、および温度が高くなると、より低いカップー価が得られることがわかる。カップー価の変動は、温度(8.6)よりもアルカリ添加率(14.5)に最も敏感であり、蒸解時間に関しては、中間(4.5)である。独立変数の中央点では、カップー価の実験値と予測値は、それぞれ26.1と26.0である。

5) 裂断長と比破裂強度

裂断長と比破裂強度に関しては、もし低い値を得るには、アルカリ添加率を増やし、蒸解時間を延ばすべきである。より高い裂断長は、活性アルカリ添加率の中央点で得られ

る(図10と図11)。時間と温度の裂断長と比破裂強度への効果は、活性アルカリ添加率よりも少ない(図12と図13)。中央値では、裂断長の実験値と予測値は同じになる。

6) 比引裂き強度

比引裂き強度は、式(9)で見られるように活性アルカリ添加率、蒸解時間および温度を増やすほど、低下する。比引裂き強度でのバラツキはアルカリ添加率に関しては2.3 mNm²/gであるが、時間に関しては0.4 mNm²/g、温度のバラツキは1.5 mNm²/gである。比引裂き強度は提案した式(9)に100%合致する。

今回の蒸解条件では、アカシア・アウリカリフォルミスの密度は0.461-0.519 g/ccである。耐折強さと密度は、式(1)には合わない。そのため、それ以上の検討は中止した。

4. 結 言

アカシア・アウリカリフォルミスはバン格拉デシュでの伝統的な熱帯広葉樹に代わる材として有望である。パルプ特性は、二次の多項式で表される独立変数によく合致した。通常のカップー価での精選収率は、独立変数の中央点で得られる。全収率とカップー価は、アルカリ添加率が増えるほど、蒸解時間が長くなるほど、また温度が高くなるほど低下する。全ての従属変数を考慮すれば、規準化した値の中央点が最も良い結果であることがわかった。

References

- 1) Aknazarova S. and Kafarov V. : 1982, Experiment optimization in Chemistry and Chemical Engineering, Mir Publisher, Moscow
- 2) FAO : 2003, Production Annuary, Rome
- 3) Montgomery D. C. and Diseno Y. : 1991, analisis de experimentos, Grupo Editorial Iberoamericano
- 4) Cossalter C. and Smith P. C. : 2003, Fast-Wood Forestry Myths and Realities, CIFOR, Jakarta, Indonesia, p 50
- 5) Kharistova P. and Karar I. : 1999, Soda-anthraquinone pulp from three *Acacia nilotica* subspecies, Biore-source Technology 68, 209-213
- 6) Logan, A. F. and Balodis V. : 1982, The Malaysian Forester 42 (2) 217-236
- 7) Miyanishi T. and Watanabe K. : Kraft pulping of *Acacia mangium*, 2004 Tappi Pulping, Engineering and Environment Conference Proceedings (CD version)
- 8) World Agroforestry Centre : 2005, Tree databases, Agroforestry Database 3.0 (CD-version)