

挤压加工饲料对饲养虹鳟鱼 (*Oncorhynchus mykiss*) 的表观养分消化率的影响¹

程宗佳 博士 美国大豆协会饲料技术主任
Ronald W. Hardy 博士 美国爱达荷大学

摘 要

本项目研究虹鳟鱼 *Oncorhynchus mykiss* 对经过挤压加工的豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉等几种饲料原料中的干物质、粗蛋白、粗脂肪、能量和矿物质的表观消化率(ADC)。还测定了豆粕中氨基酸的利用率。几种原料先经过预调制(温度 89 °C-93 °C),再用 Wenger X-85 挤压机进行挤压。未挤压的处理原样使用,不进行预调制。测定表观消化率之前,挤压的和未挤压的原料都按 3 : 7 比例与一种酪蛋白-白明胶参照饲料混合。总共 135 条鳟鱼(平均初重 $223.4 \pm 12.7\text{g}$) 饲养在 9 个 140L 有机玻璃鱼缸内,每缸 15 条鱼,随机投放上述 4 种原料(挤压的和未挤压的)加参照饲料制作的 8 种饲料之一。第一周收集粪便后,各缸之间轮换投放饲料种类。第二周经 5 日适应期后,再次收集粪便。用氧化钪作内标记。试验结果显示,挤压加工显著提高干物质、粗脂肪和总能的表观消化率,降低粗蛋白、磷、铜、铁和锌的表观消化率。试验结果还表明,挤压加工对化学组成和养分表观消化率的影响取决于原料种类。建议在用经过挤压加工的饲料喂养虹鳟鱼时,将几种微量元素如铜、铁、锌的添加量增加 10~20%,因为挤压加工降低了虹鳟鱼对植物性原料中这类矿物质的生物利用率。

前 言

综合运用水分、压力、温度和机械剪切作用的挤压加工技术,已在食品工业采用了将近一百年。挤压造成物料的物理和化学变化,如粒度减小、淀粉糊化及酶的失活。温和的挤压加工通常会提高动物对植物蛋白的消化率(Srihara 和 Alexander 1984; Håkansson 等, 1987),但对鲑鱼科是否如此,尚有待研究。

鱼粉生产目前在世界范围未见增长,因此必须用更多的植物性原料配制饲料,以适应鱼饲料生产预期的增长。植物性原料含有淀粉,淀粉必须糊化才能被鱼消化。挤压加工可使淀粉糊化,从而改善鲑鱼科对淀粉的消化(Henrichfreise 和 Pfeffer 1992; Thodesen 和 Storebakken 1998)。前人证明,挤压加工可提高双低油菜籽对大鳞大马哈鱼 (*Oncorhynchus tshawytscha*) 的营养价值(Satoh 等, 1998),可提高菜籽和豌豆(Gomes 等, 1993)、豆粕(Satoh 等, 1997)对虹鳟鱼的营养价值,还可提高脱壳豌豆粉对欧洲鲈鱼 (*Dicentrarchus labrax*) 的营养价值(Gouveia 和 Davis 2000)。鉴于目前更多地采用植物性原料配制鱼饲料,应该更关注营养成分,特别是矿物质的生物利用率,因为植物性原料的矿物质含量低于鱼粉(NRC 1993)。挤压加工对矿物质利用率的影响尚不清楚。本试验的目的即在于: 1) 确定挤压加工对豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉化学成分的影响,以及虹鳟鱼对经过挤压加工的这几种原料中养分的表观消化率; 2) 比较挤压加工对豆粕氨基酸组成的影响和虹鳟鱼对挤压豆粕氨基酸的利用率。

材料和方法

试验饲料制备

将溶剂浸出的去皮豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉 (Rangen Inc., Buhl, Idaho, USA 供货), 用 Wenger X-85 双螺旋挤压机 (Wenger Mfg. Inc., Sabetha, Kansas, USA 生产) 进行挤压; 挤压前这些原料在下列条件下进行预调制: 温度 89 °C - 93 °C, 蒸气流量 20 kg/h, 水流量 11- 22 kg/h。物料出模温度为 93 - 96 °C。未挤压处理原样使用, 不作预调制。每种原料 (挤压的和未挤压的) 按 30%与酪蛋白-白明胶参照饲料 (70%, 表 1) 混合, 以测定原料的表观消化率。干的原料与水 (30%) 和微量元素溶液 (1%) 混合后进行制粒。配制了 9 种试验饲料, 用一台 4 mm环模面条机制成颗粒, 在大约 20 °C 通夜风干, 室温保存一周后使用。

表 1 基础饲料的组成

原料	g/kg
酪蛋白 ¹	440.0
白明胶 ²	105.0
糊精 ²	110.0
羧甲基纤维素 ²	10.0
α-纤维素 ²	45.0
复合矿物质 ³	33.0
复合维生素 ⁴	20.0
复合氨基酸 ⁵	41.0
抗坏血酸 ⁶	2.0
氯化胆碱 ¹	10.0
氧化钼 ²	0.1
增味剂 ⁷	13.9
鱼油 ⁸	170.0
微量元素溶液 ⁹	(10.0)
水	(300.0)

¹购自 ICN Biomedicals, Inc., Cleveland, Ohio, USA

²购自 Sigma Chemical Co., St. Louis, Missouri, USA

³给每 kg 饲料提供: KCl, 12.4 g; CaHPO₄, 22 g; MgO, 3 g; NaCl, 2.7 g

⁴给每 kg 饲料提供: 硫胺素 62 mg, 核黄素 71 mg, 烟酸 294 mg, 泛酸钙 153 mg, 吡哆醇 50 mg, 叶酸 22 mg, 维生素 B₁₂ 0.08 mg, 生物素 0.8 mg, myoinositol, 176 mg, 维生素 A 8818 IU, 维生素 D₃ 588 mg, 维生素 E 670 mg, 复合水溶性维生素 K 37mg

⁵给每 kg 干饲料提供: 蛋氨酸 10 mg, 精氨酸 10mg、组氨酸 3 mg、赖氨酸 10mg、甘氨酸 10mg、苏氨酸 2 mg

⁶购自 Hoffman La-Roche, Basel, Switzerland

⁷增味剂, 含甜菜碱 48%, 购自 EWOS Canada, LTD, Surrey, B.C., Canada

⁸购自 Rangen Inc., Buhl, ID, USA

⁹给每 kg 干饲料提供：KI, 1.5 mg; MnSO₄ · H₂O, 20 mg; ZnSO₄ · 7H₂O, 75 mg; Na₂SeO₃, 2 mg; CoCl₃ · 6H₂O, 1.0 mg; CuSO₄ · 5H₂O, 3 mg; FeSO₄ · 7H₂O, 50 mg

饲养和取样

试验在美国爱达荷大学 Hagerman 养鱼场进行。总共 135 条虹鳟鱼,最初平均体重 223.4 ± 12.7 g, 分在 9 个 140L 有机玻璃鱼缸里饲养, 每缸 15 条。各缸随机投放一种试验饲料。以 5 L/min 速度给鱼缸连续供水 (15 °C)。

用荧光灯让鱼接受一段 14 L:10 D 光照期。鱼在试验缸内适应两周, 这期间给所有的鱼都喂一种商业虹鳟鱼饲料(商品名和产地 Silver Cup, Murray, Utah, USA), 该饲料含 10%水、42%粗蛋白、12%粗脂肪、3%粗纤维和 9%灰分。每天下午 1 点喂一次试验饲料, 明显吃饱为止。如此持续一周后开始收集粪便。喂食之后清理鱼缸, 粪便收集于一个沉积柱内(Cho 等, 1982; Hajen 等, 1993), 次日早 8 点将柱腾空。第一周收集粪便后, 各缸之间轮换投放饲料种类, 5 天后再次收集粪便。根据 Rawles 和 Gatlin (2000) 的方法, 每个时段收集的粪便代表一个重复, 都分别进行分析。试验期间未发现鱼的死亡和疾病。

化学分析

将饲料放在对流烘箱内 105°C 烘干 2h, 粪便通夜烘干。干燥的样品用手工研磨粉碎。双份平行样品用 LECO FP-428 测氮仪 (LECO Instruments, St. Joseph, MI, USA) 测定粗蛋白 (总氮 × 6.25)。用 LECO TFE 2000 (LECO Instruments, St Joseph, Michigan, USA) 提取粗脂肪, 用超临界 CO₂ 作溶剂。马弗炉 550 °C 灰化测定灰分。测定总能采用绝热弹式热量计 (Parr Instrument Co., Moline, Illinois, USA)。用纤维分析仪 (Model #F200, Ankom Analytic Instrumentation and Engineering, Fairport, New York, USA) 测定粗纤维, 以 H₂SO₄ 和 NaOH 进行样品消化。矿物元素用 Optima 3200 原子分光光度仪 (Perkin-Elmer Corp., Norwalk, Connecticut, USA) 测定, 扼要地说, 将双份平行的饲料和粪便样品置 60°C 下干燥 48 h, 粉碎至通过 1mm 筛, 取 0.25g 试样加进 3ml 浓缩的微量元素级硝酸, 室温放置过夜进行预消化, 然后在 115°C 消化 3-4h。用 18MΩ · cm 水将消化物稀释至 10ml, 用以分析钙、钾、镁、硫、磷、铜、铁、锰、锌和钼。含豆粕的平行饲料和粪便样品还用 Beckman System 6300 氨基酸分析仪 (Beckman Instruments, Inc., Fullerton, California, USA) 测定氨基酸。

计算和统计方法

计算干物质、粗蛋白、粗脂肪、总能和矿物质的表观消化率, 是以钼作为非吸收指示剂, 从日粮计算各种养分的净吸收率 (Marcus 和 Lengemann 1962; Hardy 1989; Sugiura 等, 1998)。参照饲料和试验饲料的养分表观消化率算式如下: 表观消化率 (%) = 100 × [1 - (饲料钼浓度 / 粪便钼浓度) × (粪便养分浓度 / 饲料养分浓度)] (Maynard 和 Loosli 1969; NRC 1993)。参照饲料和试验饲料的干物质消化率算式如下: 表观消化率 (%) = 100 × [1 - (饲料钼浓度 / 粪便钼浓度)]。

试验原料中营养成分的表观消化率用下列公式计算 (Cho 和 Slinger, 1979): 表观消化率 = [试验饲料消化率 - (1 - i) × 参照饲料消化率] / i, 其中: i 是所计算的原料在试验饲料中的%, 本试验中 i = 30% 或 0.3。试验原料的可消化能 (DE) 计算式如下: 可消化能 (kJ / g) = 表观消化率 (%) × 总能 (kJ / g)。化学成分和表观消化率数据经过 t-检验

以确定挤压加工对试验原料化学成分的影响，以及对豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉中粗蛋白、粗脂肪、总能和矿物质的表观消化率的影响。统计计算由电脑软件 Prism 第三版 (GraphPad, Inc., San Diego, California, USA) 执行；P < 0.05 定为统计上差异显著。

结 果

经过挤压加工和未经挤压加工的试验原料的化学成分列入表 2。烘干条件影响挤压产品的含水量，故将数据列出，可与干基作比较。挤压加工增加豆粕中粗蛋白、粗脂肪和硫的含量，降低其钙、镁浓度，但对粗纤维、灰分、总能、钾、镁、磷、铁和锌没有明显影响。对于大麦，挤压加工使粗脂肪和铁明显减少，但对其它营养成分没有影响。对于玉米面筋粉，挤压加工增加粗脂肪、钙、钾、镁、锰和锌的含量，减少粗蛋白和硫的含量，对其它营养成分没有影响。对于全麦粉，挤压加工增加粗蛋白、硫和铜的含量，降低粗脂肪、钾、锰和锌的含量，不影响其它养分含量。

豆粕的氨基酸组成和利用率列入表 3。挤压的与未挤压的豆粕之间没有明显差别。分别用挤压的与未挤压的豆粕为主的饲料养鱼，氨基酸的利用率也没有明显差别。所有氨基酸的利用率都高，必需氨基酸的利用率高于 98%；非必需氨基酸的利用率高于 97%。

试验原料的养分表观消化率列入表 4。挤压加工提高豆粕中粗脂肪的表观消化率，降低铁和锌的表观消化率，但不影响其它养分的表观消化率。对于大麦，挤压加工提高干物质和粗脂肪的表观消化率，降低粗蛋白、磷、铜和锌的表观消化率，对其它养分的表观消化率没有影响。挤压加工提高玉米面筋粉总能的表观消化率，降低粗蛋白、硫、铜、铁和锌的表观消化率，但不影响其它养分的表观消化率。对于全麦粉，挤压加工提高干物质和总能的表观消化率，但显著降低粗蛋白、粗脂肪、镁、磷、硫、铜和锌的表观消化率。

表 2 挤压或未挤压的试验原料化学分析结果 (除水分一项外均为干基, n = 2)¹

项 目	豆 粕		大 麦		玉米面筋粉		全 麦 粉	
	未挤压	挤压	未挤压	挤压	未挤压	挤压	未挤压	挤压
水分 (g/kg)	110.4	87.5	116.5	139.7	82.2	101.1	87.1	97.6
粗蛋白 (g/kg)	539.3	550.4*	120.9	120.0	816.7	765.6*	128.9	191.4***
粗脂肪 (g/kg)	6.6	11.9*	18.5	5.1**	15.6	18.9	16.8	3.1***
粗纤维 (g/kg)	34.3	12.9	46.8	45.8	15.9	17.2	21.9	20.3
灰分 (g/kg)	36.2	32.7	10.1	9.6	8.5	6.7	19.4	15.0
总能 (kJ/g)	19.1	20.0	19.4	19.9	26.5	24.2	17.2	18.9
钙 (g/kg)	3.6	3.4***	0.5	0.5	0.1	0.2*	0.8	0.7
钾 (g/kg)	24.5	23.0	4.5	4.0	0.4	0.8*	4.6	4.2*
镁 (g/kg)	3.1	3.0	1.3	1.2	0.1	0.2*	1.4	1.2
磷 (g/kg)	7.2	7.2	3.3	2.9	4.5	4.5	3.5	3.5
硫 (g/kg)	4.3	4.9**	1.4	1.3	8.6	8.1	1.4	2.1***
铜 (mg/kg)	16.5	17.5	3.8	3.7	19.5	18.5	3.9	5.3**
铁 (mg/kg)	52.5	57.5	41.5	35.5*	62.5	64.0	31.5	37.0
锰 (mg/kg)	46.0	43.5*	15.5	16.0	2.0	4.0**	40.5	33.0**

锌 (mg/kg) 51.0 49.0 19.5 18.5 14.0 15.0 29.0 27.0

¹星号表示同一种原料挤压加工与未挤压加工之间差异显著

(* P < 0.05; ** P < 0.01; *** P < 0.001)。

表 3 豆粕的氨基酸组成 (干基%) 和虹鳟鱼对豆粕中氨基酸的利用率 (% , n = 2)

项 目	氨基酸组成		氨基酸利用率	
	豆 粕	挤压豆粕	豆 粕	挤压豆粕
必需氨基酸				
精氨酸	3.27	3.29	99.5	99.5
组氨酸	1.28	1.30	99.2	99.1
异亮氨酸	2.14	2.29	98.6	98.6
亮氨酸	4.41	4.61	98.9	98.7
赖氨酸	2.80	2.80	99.4	99.4
蛋氨酸	0.76	0.76	99.5	99.3
苯丙氨酸	2.54	2.60	99.1	98.9
苏氨酸	1.88	1.92	98.1	98.3
色氨酸	0.56	0.70	98.2	98.4
缬氨酸	2.25	2.39	99.1	99.0
非必需氨基酸				
丙氨酸	2.47	2.53	98.7	98.4
天冬氨酸	5.22	5.29	98.8	98.7
胱氨酸	0.79	0.82	97.2	97.2
谷氨酸	9.22	9.67	99.4	99.3
甘氨酸	1.92	1.94	98.9	98.9
脯氨酸	2.72	2.82	99.2	99.1
丝氨酸	2.25	2.43	98.8	98.8
酪氨酸	1.79	1.85	98.3	98.4

根据 4 种试验原料总能的表观消化率, 计算出未经挤压的豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉的可消化能分别为 15.1、9.4、21.2、和 9.3 kJ /g; 挤压加工的豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉的可消化能分别为 16.4、13.9、21.5、和 14.6 kJ /g。

讨 论

挤压加工对各种饲料原料的化学成分有所影响, 并涉及虹鳟鱼对其中各种养分的消化率, 这些影响因原料种类而异 (表 2-4)。本试验用来计算试验原料表观消化率的公式来自 Cho 和 Slinger (1979)。已发表的研究中用来计算各种原料表观消化率的公式各有不同 (Kleiber 1961; Sugiura 等 1998; Bureau 等 1999)。每种公式各有优点, 但多数都是用来计算饲料主要成份的消化率; 进一步说, 用这些公式时矿物质补充可能成为一个混淆因

子。因此,本试验采用 Cho 和 Slinger (1979)的公式。不过,将来必须建立一个可用来计算各种原料中所有养分(包括微量元素)的表观消化率的公式(Sugiura 2000)。

Nierle 等 (1980)发现,挤压后的玉米 60%粗脂肪丢失。由于脂类可生成直链淀粉-脂类复合物,粗脂肪含量是可能减少的,这会降低溶剂浸出效率。粗脂肪在挤压当中还可能通过蒸馏而蒸发。本试验中,试验饲料平均粗脂肪含量从 14.3 降到 9.8 g /kg,但豆粕和玉米面筋粉的粗脂肪含量实际上都增加。这些差异可能是由于谷物和豆粕的粗脂肪含量都很低,分析或取样的微小误差会导致大的差异的缘故。

表 4 虹鳟鱼对挤压或未挤压的试验原料中营养成分的表观消化率(% , n = 2)¹

项 目	豆 粕		大 麦		玉米面筋粉		全 麦 粉	
	未挤压	挤压	未挤压	挤压	未挤压	挤压	未挤压	挤压
干物质	75.4	78.4	43.6	67.2 [*]	74.2	86.0	46.7	71.1 [*]
粗蛋白	98.1	98.1	95.6	94.3 [*]	87.4	75.4 ^{***}	95.6	90.2 [*]
粗脂肪	73.0	86.1 [*]	72.6	80.7 [*]	76.0	75.7	77.3	74.4 [*]
总能	79.1	81.9	48.5	69.9	80.0	88.9 [*]	54.0	77.1 ^{**}
钙	7.4	8.6	29.4	24.4	1.5	7.7	20.9	19.8
钾	99.8	99.7	99.3	99.4	99.6	99.5	99.1	99.5
镁	78.9	78.4	89.7	89.4	76.6	75.3	87.9	85.9 [*]
磷	63.2	60.6	76.3	70.6 ^{**}	65.6	64.7	71.1	67.4 [*]
硫	98.1	97.9	96.5	96.4	94.7	91.8 [*]	96.7	94.8 ^{**}
铜	94.9	94.2	88.3	81.7 ^{***}	85.2	77.3 ^{***}	86.6	79.4 ^{***}
铁	77.2	54.0 ^{**}	55.9	53.4	78.7	33.4 [*]	54.4	47.5
锰	30.6	32.3	43.8	42.7	42.5	42.2	36.5	26.9
锌	64.7	58.1 [*]	55.4	48.0 ^{**}	53.0	45.4 ^{**}	56.0	40.9 ^{***}

¹星号表示同一种原料挤压加工与未挤压加工之间差异显著

(* P < 0.05; ** P < 0.01; *** P < 0.001)

挤压加工会改变膳食纤维的含量和组成。Wang 等 (1993) 报道, 经过挤压的小麦和麦麸, 其膳食纤维总量和可溶性膳食纤维含量比未挤压的稍有下降。Fornal 等 (1987) 发现, 荞麦、大麦和玉米混合料经过挤压后, 膳食纤维含量减少。Björck 等 (1984) 报道, 挤压加工使小麦粉可溶性纤维从 40% 增加到 50-75%; 增加的可溶性纤维能改善纤维的消化率, 从而提高可消化能, 因为非反刍动物 (如猪) 能利用纤维满足自身 30-50% 的能量需要, 其途径是将纤维发酵为挥发性脂肪酸。在虹鳟鱼体内是否如此尚有待研究。按本试验结果, 所有试验原料的可消化能都有增加, 但挤压加工并未改变膳食纤维总量, 这一点不同于其他研究报告 (Schweizer 和 Reimann 1986; Siljestrom 1986)。本试验得出, 小麦粉挤压后, 粗纤维从 21.9 降为 20.3 g /kg, 4 种材料的平均粗纤维含量从 29.7 降为 29.1 g /kg, 影响不算显著。

挤压加工对粗蛋白、总能、灰分和矿物质含量的影响也颇受人关注。本试验的数据显示, 挤压加工对粗蛋白、总能、灰分、钙、钾、镁、磷、硫、铜、铁、锰和锌有所影响,

影响程度因原料种类而异。Hilton 等 (1981)报道, 挤压的虹鳟鱼饲料与蒸汽制粒的饲料相比, 粗蛋白含量略高, 粗脂肪和灰分略低。

本试验的结果显示, 虹鳟鱼对豆粕中粗蛋白的表观消化率和氨基酸的利用率是很高的。大豆种植遍及全球, 豆粕以其优良的氨基酸组成而成为最广泛地用来作为动物饲料蛋白来源的植物性原料。然而, 美国制作的商业虹鳟鱼饲料含大量鱼粉, 只有 5-10%豆粕。鉴于目前世界鱼粉生产不见增长, 有必要探讨在虹鳟鱼饲料中使用更多豆粕的可能性。豆粕中粗蛋白和氨基酸的利用率都很高, 这一试验结果为在虹鳟鱼饲料中使用更多豆粕的合理性提供了有力证据。

挤压加工对大多数营养成分的表观消化率的影响都是显著的。本项研究表明, 挤压加工提高了干物质、粗脂肪和总能的表观消化率, 从而也提高了可消化能。干物质表观消化率的提高, 因减少固体向水域的排放而有利于环保; 粗脂肪表观消化率和可消化能的提高, 会增进虹鳟鱼体内的饲料转化率。不过, 挤压加工也会显著降低粗蛋白、磷、铜、铁和锌的表观消化率。粗蛋白表观消化率下降发生在以大麦、玉米面筋粉和全麦粉作原料的场合, 而不是豆粕。豆粕中粗蛋白的表观消化率, 即使经过挤压后仍然很高 (98.1%), 说明挤压加工对豆粕中粗蛋白的表观消化率没有什么影响。钙和钾的表观消化率在挤压后没有变化, 所有原料中钙的表观消化率都很低, 钾的都很高。然而, 几乎所有原料中镁、磷、硫、铜、铁、锰和锌的表观消化率经挤压后都下降; 锌的表观消化率下降在所有原料中都显著。矿物质, 特别是微量元素如铜、铁和锌的表观消化率下降, 说明了植物性蛋白为主的虹鳟鱼饲料补充微量矿物元素的重要性。据本研究的结果, 经过挤压加工的虹鳟鱼饲料添加的铜、铁和锌, 应比 NRC (1993) 推荐量高出 10-20%。

结 语

挤压加工广泛应用于宠物饲料和食品工业, 目前在家禽、猪和鱼的饲料制作中普遍采用。粗脂肪表观消化率和能量利用率的提高通常都会增进饲料效率; 但挤压加工同时会降低粗蛋白的表观消化率, 降低矿物质, 特别是微量元素的生物利用率。因此, 如果饲料原料中有大量植物性原料, 并且经过挤压加工制成虹鳟鱼饲料, 建议多加 10-20%的复合微量元素。

致 谢

十分感谢 Wenger Manufacturing Inc. 公司的 Galen Rokey 先生为本项研究进行试验原料的挤压加工。感谢 Mike Casten, Carol Hoffman, Jana Cole 和 Lori Ambrose 的协助。还感谢两位匿名评阅人对本文的建议和帮助。

参 考 文 献

- Björck, I., Nyman, M. & Asp, N.G. (1984)** Extrusion cooking and dietary fiber: Effects on dietary fiber content and on degradation in the rat intestinal tract. *Cereal Chem.*, 61, 174-179.
- Bureau, D.P., Harris, A.M. & Cho, C.Y. (1999)** Apparent digestibility of rendered animal protein ingredients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 180, 345-358.
- Cho, C.Y. & Slinger, S.J. (1979)** Apparent digestibility measurement in feedstuffs for rainbow trout. In: Halver, J.E. & Tiews, K. (Eds.), *Finfish Nutrition and Fish Feed Technology 2*, 239-247. Heinemann, Berlin.
- Cho, C.Y., Slinger, S.J. & Bayley, H.S. (1982)** Bioenergetics of salmonid fishes: energy intake, expenditure and productivity. *Comp. Biochem. Physiol.*, 73B, 25-41.

- Fornal, L., Soral-Smietana, M., Smietana, Z., & Szpendowski, J. (1987)** Chemical characteristics and physico-chemical properties of the extruded mixtures of cereal starches. *Starch/starke*, 39, 75-78.
- Gomes, E.F., Corraze, G. & Kaushik, S. (1993).** Effect of dietary incorporation of a co-extruded plant protein (rapeseed and peas) on growth, nutrient utilization and muscle fatty acid composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 113, 339-353.
- Gouveia, A. & Davis, S.J. (2000)** Inclusion of an extruded dehulled pea seed meal in diets for juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Aquaculture*, 182, 183-193.
- Hajen, W.E., Beames, R.M., Higgs, D.A. & Dosanjh, B.S. (1993)** Digestibility of various feedstuffs by post-juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in sea water: 1. Validation of technique. *Aquaculture*, 112, 321-332.
- Hardy, R.W. (1989)** Diet preparation. In: Halver, J.E. (Ed.), *Fish Nutrition*, 2nd ed. Academic Press, New York. pp.473-546.
- Håkansson, B., Jägerstad, M., Öste, R., Åkesson, B. & Jonsson, L. (1987)** The effects of various thermal processes on protein quality, vitamins and selenium content in whole-grain wheat and white flour. *J. Cereal Sci.*, 6, 269-282.
- Henrichfreise, B. & Pfeffer, E. (1992)** Wheat and wheat starch as potential sources of digestible energy for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 67, 143-147.
- Hilton, J.W., Cho, C.Y. & Slinger, S.J. (1981)** Effect of extrusion processing and steam pelleting diets on pellet durability, pellet water absorption, and the physiological response of rainbow trout (*Salmo gairdneri* R.) *Aquaculture*, 25, 185-194.
- Kleiber, M. (1961)** *The Fire of Life: An Introduction to Animal Energetics*. John Wiley & Sons, New York. pp. 255-257.
- Marcus, C.S. & Lengemann, F.W. (1962)** Use of radioyttrium to study food movement in the small intestine of the rat. *J. Nutr.*, 76, 179-182.
- Maynard, L.A. & Loosli, J.K. (1969)** *Animal Nutrition*, McGraw-Hill, New York.
- Nierle, W., El Baya, A. W., Seiler, K., Fretzdorff, B. & Wolff, J. (1980)** Veränderungen der Getreideinhaltsstoffe während der Extrusion mit einem Doppelschneckenextruder. *Getreide Mehl Brot.*, 34, 73-76.
- NRC (National Research Council). (1993)** *Nutrient Requirements of Fish*, National Academy Press, Washington, D.C.
- Rawles, S.D. & Gatlin III, D.M. (2000)** Nutrient digestibility of common feedstuffs in extruded diets for sunshine bass *Morone chrysops* x *M. saxatilis* . *J. World Aquaculture Society*, 31, 570-579.
- Satoh, S., Porn-Ngam, T., Akimoto, A., Takeuchi, N. & Watanabe, T. (1997).** Effect of substitution of white fish meal with extruded soybean meal in diets on zinc and manganese availability to rainbow trout. *Suisan Zohshouku*, 45, 275-284.
- Satoh, S., Higgs, D.A., Dosanjh, B.S., Hardy, R.W., Eales, J.G. & Deacon, G. (1998)** Effect of extrusion processing on the nutritive value of canola meal for chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in seawater. *Aquaculture Nutr.*, 4, 115-122.
- Schweizer, T.F. & Reimann, S. (1986)** Influence of drum-drying and twin-screw extrusion cooking on wheat carbohydrates. I. A comparison between wheat starch and flours of different extraction. *J. Cereal Sci.*, 4, 193-203.
- Siljestrom, M., Westerlund, E., Björck, I., Holm, J. & Asp, N. G. (1986)** The effects of various thermal processes on dietary fiber and starch content of whole grain wheat and white flour. *J. Cereal Sci.*, 4, 315-323.

- Srihara, P. & Alexander, J. C. (1984)** Effect of heat treatment on nutritive quality of plant protein blends. *J. Can. Inst. Food Sci. Technol.*, 17, 237-241.
- Sugiura, S.H., Dong, F.M., Rathbone, C.K. & Hardy, R.W. (1998)** Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds. *Aquaculture*, 159, 177-202.
- Sugiura, S.H. (2000)** Digestibility. In: Stickney, R.R. (Ed.), *Encyclopedia of Aquaculture*, John Wiley & Sons, New York. pp. 209-218.
- Thodesen, J. & Storebakken, T. (1998)** Digestibility of diets with precooked rye or wheat by Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Aquaculture Nutr.*, 4, 123-126.
- Wang, W.M., Klopfenstein, C.F. & Ponte, J.G. (1993)** Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran and on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chem.*, 70, 707-711.